

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**“Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite
en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca
Puyango – Tumbes 2022”**

TESIS

Para optar el título profesional de INGENIERO AGRÍCOLA

Autor:

Christian Eduardo Cornejo Ruiz

Asesor:

Dr. Ing. Eber Gines Tafur

Coasesor:

MSc. Ing. Harold Llauca Soto

Tumbes, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**“Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite
en la representación de la hidrológica de la cuenca Puyango-
Tumbes 2022”**

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. José Modesto Carrillo Sarango

Código ORCID: 0000-0003-0841-3064

Presidente

Dr. Luis Jhony Caucha Morales

Código ORCID: 0000-0002-4786-9008

Secretario

Mg. Deciderio Atoche Ortiz

Código ORCID: 0000-0002-3300-330X

Vocal

Tumbes, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



**“Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite
en la representación de la hidrológica de la cuenca Puyango-
Tumbes 2022.”**

**Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y
forma.**

Bach. Christian Eduardo Cornejo Ruiz

Autor

Dr. Eber Gines Tafur

Código ORCID: 0000-0003-0366-4438

Asesor

MSc. Harold Llauca Soto

Código ORCID: 0000-0001-7462-2548

Coasesor

Tumbes, 2023

COPIA DE ACTA DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA
TUMBES - PERÚ



"Año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

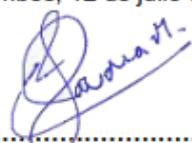
En Tumbes, a los doce días del mes julio el dos mil veintitres siendo las ocho horas y cinco minutos, en la modalidad virtual, a través de la plataforma meet cuyo link es <https://meet.google.com/fnk-cguz-qau>, se reunieron el jurado calificador de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes, designados por Resolución N° 057-2022/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D, **Dr. José Modesto Carrillo Sarango** (Presidente); **Dr. Luis Jhony Caucha Morales** (Secretario); **Mg. Deciderio Atoche Ortiz** (Vocal) reconociendo en la misma resolución además, al ; **Dr. Eber Gines Tafur** como asesor y como co-asesor al Mg Harold Omar Llauca Soto, se procedió a evaluar, calificar y deliberar la sustentación de la tesis, titulada y defensa del informe final de la tesis titulada: **"Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango-Tumbes 2022"** para optar el Título Profesional de INGENIERO AGRÍCOLA, presentado por el Br. Cornejo Ruiz Christian Eduardo.

Concluida la sustentación y absueltas las preguntas, por parte del sustentante y después de la deliberación, el jurado según el artículo N° 065 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes, declara al Bach. Cornejo Ruiz Christian Eduardo, **aprobado por unanimidad**, con el calificativo **Sobre Saliente**. Se hace conocer al sustentante, que deberá levantar las observaciones finales hechas al informe final de tesis, que el jurado le indica.

En consecuencia, queda expedito para continuar con los trámites correspondientes a la obtención del título profesional de Ingeniero Agrícola, de conformidad con lo estipulado en la Ley Universitaria N° 30220, EL Estatuto, Reglamento General, Reglamento General de Grados y Títulos y Reglamento de Tesis de la Universidad Nacional de Tumbes. Siendo las veinte horas y cincuenta minutos del mismo día, se dio por concluida la ceremonia académica, en forma virtual, procediendo a firmar el acta en presencia del público asistente.

Tumbes, 12 de julio de 2023


.....
Dr. José Modesto Carrillo Sarango
DNI N° 00223850
Código ORCID 0000-0003-0841-3064
Presidente


.....
Dr. Luis Jhony Caucha Morales
DNI N°41378388
Código ORCID 0000-0002-4786-9008
Secretario


.....
Mg. Deciderio Atoche Ortiz
DNI N°00251292
Código ORCID 0000-0002-3300-330
Vocal

CC.

- Jurados (03)
- Asesor
- Interesado

- Co-asesor
- Archivo
- Decanato

Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango – Tumbes 2022

por Christian Eduardo Cornejo Ruiz



Fecha de entrega: 24-ago-2023 05:48p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2150771229

Nombre del archivo: TESIS-CORNEJO-RUIZ-FINAL_UNTUMBES.pdf (7.63M)

Total de palabras: 29813

Total de caracteres: 132550

Aplicación de productos de precipitación estimada por satélite en la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango – Tumbes 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	10%	3%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS



1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.senamhi.gob.pe Fuente de Internet	<1%
5	eva.fing.edu.uy Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.serperuano.com Fuente de Internet	<1%
8	sinia.minam.gob.pe Fuente de Internet	<1%

9	Submitted to Universidad Nacional de Tumbes Trabajo del estudiante	<1 %
10	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	purl.org Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.uniandes.edu.co Fuente de Internet	<1 %
13	minagri.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Martin Blanco, Eleonora Demaria, Georgina Cazenave, Erik Zimmermann. "Validación y corrección de estimaciones de precipitación satelital utilizando observaciones en superficie en la región Pampeana Argentina", Tecnología y ciencias del agua, 2022 Publicación	<1 %
15	www.revistatyca.org.mx Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1 %



<1 %

19 **datospdf.com**
Fuente de Internet

<1 %

20 **www.senamhi.gob.pe**
Fuente de Internet

<1 %

21 **repositorio.ucam.edu**
Fuente de Internet



<1 %

22 **repositorio.udh.edu.pe**
Fuente de Internet

<1 %

23 **LIA RAMOS FERNANDEZ. "Estudio de la
utilidad de la lluvia estimada de satélite en la
modelación hidrológica distribuida",
Universitat Politecnica de Valencia, 2013**
Publicación

<1 %

24 **alicia.concytec.gob.pe**
Fuente de Internet

<1 %

25 **Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería
& Tecnología**
Trabajo del estudiante

<1 %

26 **repositorio.urp.edu.pe**
Fuente de Internet

<1 %

27 **Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería
& Tecnología**
Trabajo del estudiante

<1 %

28

dspace.unitru.edu.pe
Fuente de Internet

<1%

29

www.mdpi.com
Fuente de Internet

<1%

30

Fei Fan, Shangze Dai, Keke Zhang, Haiqian Ke.
"Innovation agglomeration and urban
hierarchy: evidence from Chinese cities",
Applied Economics, 2021
Publicación

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo



DEDICATORIA

Primero a Dios por permitirme despertar cada día con salud y ayudarme a cumplir mis objetivos propuestos brindándome fortaleza en mis momentos de debilidad, a mi amada familia, sobre todo a mis padres Carlos y Mariupsy por el constante apoyo y ejemplo de vida que he admirado y seguido durante todos estos años de estudios y a mis hermanos que quiero y estimo mucho.

AGRADECIMIENTOS

Mi total agradecimiento al MSc. Harold Llauca, por su constante guía y enseñanza durante la realización de la presente tesis. Un especial agradecimiento al Dr. Gines Tafur, quien ha asesorado permanentemente la investigación, aportando enriquecedores comentarios y sugerencias. Finalmente, pero no por ello menos importante, a mis amigos y compañeros de la carrera por los momentos vividos, especialmente a Dayana y Paulo por el apoyo mutuo durante esta experiencia.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. REVISION LITERARIA (ESTADO DEL ARTE)	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Estudios a nivel internacional.....	1
1.1.2. Estudios a nivel nacional.....	2
1.2. Definición de términos básicos	3
1.2.1. Precipitación.....	3
1.2.2. Productos de precipitación estimada por satélite (PPES)	3
1.2.3. Sistema hidrológico	9
1.2.4. Modelo hidrológico conceptual GR4J	10
1.2.5. Calibración del modelo hidrológico	15
1.2.6. Firmas hidrológicas	16
CAPÍTULO II.....	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.2. Información, equipos y programas	17
2.2.1. Recopilación de datos	17
2.2.2. Materiales y equipos	21
2.2.3. Programas	22
2.2.4. Ubicación del área de estudio.....	22
2.3. Metodología	26
2.3.1. Manejo de información climática grillada y geográfica	27
2.3.2. Evaluación estadística del sesgo	29
2.3.3. Evaluación del modelamiento hidrológico.....	31
2.3.4. Evaluación en un enfoque de firmas hidrológicas	33

CAPÍTULO III.....	36
3. RESULTADOS Y DISCUSION	36
3.2. Resultados	36
3.2.1. Evaluación meteorológica	36
3.2.2. Evaluación hidrológica	45
3.2.3. Evaluación hidrológica en un enfoque de firmas hidrológicas.....	56
3.3. Discusión.....	61
CAPÍTULO IV	64
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES.....	66
CAPÍTULO V	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del modelo GR4J, usados en esta investigación.....	15
Tabla 2. Condiciones iniciales del modelo GR4J	15
Tabla 3. Relación de las estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Puyango-Tumbes.....	17
Tabla 4. PPES seleccionados en la cuenca Puyango - Tumbes.	18
Tabla 5. Relación de estaciones hidrométricas seleccionadas en la cuenca Puyango – Tumbes.	19
Tabla 6. Materiales y equipos utilizados.....	21
Tabla 7. Características del equipo de computo	22
Tabla 8. Información geográfica necesaria	22
Tabla 9. Softwares utilizados para la realización del proyecto.	22
Tabla 10. Principales parámetros fisiográficos de las subcuencas y tramos de río	24
Tabla 11: Métricas estadísticas y sus correspondientes ecuaciones para evaluación del sesgo de los productos de PPES.....	29
Tabla 12. Periodos seleccionados de calibración y validación del modelo.	32
Tabla 13. Función Objetivo y métricas de desempeño para el modelo hidrológico GR4J.	32
Tabla 14. Firmas hidrológicas evaluadas en la cuenca Puyango - Tumbes.....	34
Tabla 15. Valores promedios de los índices estadísticos evaluados en cada subcuenca	39
Tabla 16. Resumen de los índices estadísticos de desempeño evaluados para la etapa de verificación.	55
Tabla 17. Valores de Pearson para las firmas hidrológicas evaluadas en los sectores.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Imagen referencial del producto TRMM-3B42.....	4
Figura 2: Imagen referencial del producto IMERG.	5
Figura 3. Imagen referencial del producto CMORPH.	6
Figura 4. Imágen referencial del producto CHIRPS.....	7
Figura 5: Composición de un sistema hidrológico	9
Figura 6: Diagrama estructural del modelo GR4J.....	11
Figura 7: Flujograma del Detalle Matemático del Modelo GR4J	14
Figura 8: Medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo hidrológico	16
Figura 9: Cobertura de datos hidrometeorológicos en la cuenca Puyango - Tumbes.	20
Figura 10. Caudales medios diarios disponible para el periodo 1981 - 2015, con valores atípicos, obtenidos de SENAMHI e INAMHI.	21
Figura 11. Ubicación del área de estudio, delimitación de subcuencas, tramos de ríos, red de estaciones hidrometeorológicas y sectores de calibración.	24
Figura 12. Variación altitudinal de las subcuencas delimitadas.	26
Figura 13: Flujograma de la metodología empleada.	26
Figura 14: Distribución espacial de la obertura de datos en la cuenca Puyango – Tumbes.....	27
Figura 15. Distribución espacial del Coeficiente de Correlación de Pearson (CC) entre los datos de Estaciones in situ y los PPES.	37
Figura 16. Distribución espacial del índice de PBIAS, estación – píxel.....	37
Figura 17. Distribución espacial del índice de RMSE, estación – píxel.....	38
Figura 18. Distribución lineal de los índices de evaluación del sesgo (CC, PBIAS, RMSE) en cada subcuenca ordenada de mayor a menor elevación.	41
Figura 19. Estacionalidad de la precipitación de los PPES referente a las observaciones en cada sector.	42
Figura 20. Diagramas de Taylor para la evaluación estadística por épocas del año en los sectores de calibración.....	43
Figura 21: Caudales simulados para el Sector 1, periodo 2000 - 2010.....	46
Figura 22: Caudales simulados para el Sector 2, periodo 2000 - 2015.	48
Figura 23: Caudales simulados para el Sector 3, periodo 2000 - 2015.	50

Figura 24: Curva de duración de caudales de los PPES, escala logarítmica en el eje x (periodo 2000 - 2015).	51
Figura 25: Métricas de desempeño del modelo GR4J para los diferentes PPES.	51
Figura 26: Diagrama de cajas del comportamiento de los parámetros por sectores.	53
Figura 27: Resultado de la etapa de verificación de los caudales simulados.	54
Figura 28: Comparativas de firmas hidrológicas evaluadas en el Sector 1.	56
Figura 29: Comparativas de firmas hidrológicas evaluadas en el Sector 2.	57
Figura 30: Porcentajes de sobrestimación de los valores observados en cuanto a firmas hidrológicas evaluadas - Sector 3.	58
Figura 31: Extrapolación de las 15 firmas hidrológicas en cada subcuenca de la Cuenca Puyango - Tumbes.	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Distribución temporal de la precipitación para el producto CHIRPS en las 24 subcuencas.	73
Anexo 2. Distribución temporal de la precipitación para el producto CMORPH en las 24 subcuencas.....	74
Anexo 3. Distribución temporal de la precipitación para el producto TRMM-3B42DF en las 24 subcuencas.....	75
Anexo 4. Distribución temporal de la precipitación para el producto PISCOpd en las 24 subcuencas.	76
Anexo 5. Distribución temporal de la precipitación para el producto RAIN4PE en las 24 subcuencas.....	77
Anexo 6. Distribución temporal de la precipitación para la interpolación de las Estaciones en las 24 subcuencas.....	78
Anexo 7: Precipitación media anual (mm/año) para los diferentes productos en evaluación incluida la interpolación de los datos observados.	79
Anexo 8. Correlación de Pearson, evaluación estación - píxel por cada PPES... 79	
Anexo 9. Sesgo porcentual, evaluación estación - píxel por cada PPES.	80
Anexo 10. Raíz del error medio cuadrático, evaluación estación - píxel por cada PPES.	80
Anexo 11. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto PISCOpd.	81
Anexo 12. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto RAIN4PE.....	82
Anexo 13. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto IMERGDF.....	83
Anexo 14. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto TRMM - 3B42V7.	84
Anexo 15. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto CMORPH.	85
Anexo 16. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto CHIRPS.....	86
Anexo 17: Topología de acumulación de caudales en la cuenca Puyango – Tumbes, para el modelo hidrológico GR4J.....	87

Anexo 18. Distribución espacial del porcentaje del sesgo (PBIAS %) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.	88
Anexo 19. Distribución espacial del coeficiente de correlación de Pearson (CC) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.....	89
Anexo 20. Distribución espacial del error medio cuadrático (RMSE) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.	90
Anexo 21. Valores de la evaluación del sesgo en sectores de calibración por épocas del año	91
Anexo 22. Métricas de desempeño para la calibración y validación en las estaciones de aforo (sectores de calibración), del modelo GR4J.	92
Anexo 23. Gráficos de dispersión del coeficiente de correlación de Pearson en los Sectores de calibración, para la evaluación del modelo hidrológico GR4J.....	93
Anexo 24. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 1.....	94
Anexo 25. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 2.....	95
Anexo 26. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 3.....	96
Anexo 27. Mejores productos de precipitación estimada por satélite en la evaluación de firmas hidrológicas por subcuencas.	97
Anexo 28. Media de los valores de firmas hidrológicas extrapoladas a las subcuencas para la representación espacial.....	98
Anexo 29. Distribución de los valores de las firmas hidrológicas evaluadas por subcuencas (producto de la extrapolación).	98
Anexo 30. Solicitud de datos meteorológicos de para al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).....	99

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en la cuenca transfronteriza Puyango – Tumbes hasta la estación fluviométrica El Tigre (4735 km²), y tiene como objetivo evaluar la aplicación diferentes Productos de Precipitación Estimada por Satelitales (PPES), tales como los productos TRMM-3B42V7, CHIRPS, IMERGDF, CMORPH; y productos corregidos con estaciones como PISCO y RAIN4PE; para así poder evaluar su impacto en la simulación de la respuesta hidrológica a paso de tiempo diario en la cuenca. Para ello se utiliza un enfoque de evaluación meteorológico a nivel de píxel-estación, subcuencas y zonas de calibración; y un enfoque hidrológico basado en el modelo hidrológico conceptual GR4J e índices hidrológicos (firmas hidrológicas). Los resultados muestran un buen desempeño por parte de los productos RAIN4PE, PISCO y CHIRPS siendo los que mejor representan la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango-Tumbes; sin embargo, TRMM-3B42V7 e IMERGDF presentan también un alto rendimiento en cuanto a la simulación de caudales medios y altos. Los hallazgos de este trabajo permiten discutir la aplicabilidad de los PPES en la cuenca Puyango – Tumbes, y su importancia para caracterizar la hidrología en cuencas transfronterizas, con limitado acceso a datos hidroclimáticos.

Palabras clave: Precipitación estimada por satélite, modelo GR4J, firmas hidrológicas, cuenca transfronteriza.

ABSTRACT

The research work was developed in the Puyango - Tumbes transboundary basin up to the El Tigre fluviometric station (4735 km²), and its objective is to evaluate the application of different Satellite Predicted Precipitation Estimation Products (PPES), such as TRMM-3B42V7, CHIRPS, IMERGDF, CMORPH; and products corrected with stations such as PISCO and RAIN4PE; in order to evaluate their impact on the simulation of the hydrological response at daily time step in the basin. For this purpose, a meteorological evaluation approach is used at the pixel-station, sub-basin and calibration zone levels; and a hydrological approach based on the GR4J conceptual hydrological model and hydrological indices (hydrological signatures). The results show a good performance by the RAIN4PE, PISCO and CHIRPS products being the ones that best represent the hydrological response of the Puyango-Tumbes basin; however, TRMM-3B42V7 and IMERGDF also present a high performance in terms of simulation of medium and high flows. The findings of this work allow us to discuss the applicability of PPES in the Puyango-Tumbes basin, and its importance for characterizing hydrology in transboundary basins, with limited access to hydroclimatic data.

Key words: satellite precipitation products, hydrologic modeling, hydrologic signatures, GR4J model, transboundary basin.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son las afectaciones naturales más comunes a nivel mundial. Suelen presentarse cada año en los periodos más húmedos de una región propensa a estos eventos naturales causados por una intensa precipitación en un periodo de tiempo determinado; lo que consecuentemente se traduce en pérdidas económicas de todo tipo (agrícolas, daños a viviendas, infraestructuras, etc.), así como también pérdidas de vidas humanas (CEPAL, 2014).

Siguiendo este punto, la precipitación es una variable compleja de evaluar y una de las principales forzantes para cualquier modelo hidrológico (Trenberth et al., 2003); es un reto bastante común obtener información meteorológica, debido a la baja densidad de estaciones de monitoreo o en algunos casos a la escasez de mediciones tomadas por las mismas, lo que se traduce en poca información en un periodo de tiempo que permita ser utilizada en la modelización y predicción de estos eventos naturales. Por ello se buscan nuevas alternativas metodológicas para poder resolver esta incertidumbre en la adquisición de la información necesaria (Levizzani & Cattani, 2019). Aplicar un modelo hidrológico lluvia – escorrentía, hace posible evaluar el comportamiento de un sistema hidrológico sobre un área de interés (Cerrudo et al., 2017; Juárez, 2017), y así poder predecir cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca.

El río Puyango – Tumbes conforma una cuenca de montaña tropical que se origina en el Ecuador y termina su recorrido en el Perú (Quincho, 2015), desembocando así sus aguas en el Océano Pacífico. Es la cuenca con mayor densidad de estaciones para el control hidrometeorológico en la Región Tumbes, pero la mayor parte de ellas no permiten la correcta caracterización temporal, debido al corto registro de datos que presentan o los largos vacíos de información en sus mediciones, esta problemática se da principalmente en las regiones oceánicas, remotas o en desarrollo (Cerrudo et al., 2017 ; Huffman et al., 2007).

El SENAMHI, como caso puntual, hace uso de datos obtenidos por satélite, específicamente del producto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) los cuales son posteriormente mezclados con datos de estaciones pluviométricas en tierra. Esto les permitió desarrollar un producto grillado de precipitación que abarca todo el territorio peruano, denominado Peruvian Interpolation of the SENAMHI's Climatological and hydrological data Observed (PISCO) y el subproducto PISCOpd (Aybar et al., 2020).

Los productos de precipitación estimada por satélite (PPES), son datos organizados en conjuntos, los sensores de estos satélites captan la radiación para posteriormente reconstruirla a precipitación, estos se almacenan en píxeles (rasters), la resolución de estos dependerá de la resolución que capta estas medidas el sensor del satélite; son importantes mayormente en áreas de terreno complejas donde las estaciones en tierra son escasas o inexistentes y su uso es mayormente para monitoreo y predicción de la respuesta hidrológica de una cuenca, así como para aplicaciones científicas experimentales (Alazzy et al., 2017).

Para poder determinar la aplicabilidad de los PPES es necesario investigar heterogeneidades temporales de la lluvia y sus impactos en el ciclo hidrológico que generan estos productos (Zubieta et al., 2018); así como cuantificar su real impacto por la representación de la respuesta hidrológica de las cuencas (Llauca et al., 2021). Es aquí donde las firmas hidrológicas juegan un papel importante en esta investigación debido a que son índices que permiten caracterizar el comportamiento hidrológico de una cuenca, caracterizar la representación de los flujos altos, medios y bajos, así como también comparar la variabilidad espaciotemporal de los procesos hidrológicos; no obstante, la gran variedad de estas firmas hace difícil la selección apropiada de una para la cuenca en estudio (McMillan et al., 2017, Addor et al., 2018).

Los productos satelitales como el 3B42_daily-V7 del Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), CHIRPS, Day-1 multi-satellite precipitation dada por el algoritmo Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERGDF), Climate Prediction Center Morphing Method (CMORPH) y la información del producto grillado PISCO v2.1 y Rainfall for Peru and Ecuador (RAIN4PE) han sido utilizados

en la presente investigación con el objetivo principal de generar los caudales medios diarios en la cuenca Puyango Tumbes mediante la aplicación del modelo hidrológico lluvia – escorrentía GR4J en un enfoque semidistribuido, y así evaluar la aplicabilidad meteorológica e hidrológica de estos productos y el impacto que generan en la respuesta hidrológica de la cuenca.

CAPÍTULO I

1. REVISION LITERARIA (ESTADO DEL ARTE)

1.1. Antecedentes

Aplicar la modelación hidrológica para evaluar productos de precipitación estimada por satélite resulta hoy en día una herramienta preciada a nivel mundial y nacional, por ello se han realizado diversas investigaciones en la que emplean estas variables y metodologías, como a continuación se mencionan:

1.1.1. Estudios a nivel internacional

Andrade (2016) evaluó las estimaciones de precipitación del algoritmo 3IMERGHH V3 a escala sub-diaria (30 min), donde determinó que las imágenes sub-diarias del satélite representan de manera cualitativa la precipitación en comparación de las estaciones en campo; pero en cuestiones estadísticas no se obtuvieron resultados óptimos, por lo tanto, el autor concluye que este satélite resulta más confiable a una escala diaria.

Hamza et al. (2017) realizó la evaluación del producto TRMM 3B42 V7 utilizando las mediciones de los pluviómetros de 19 estaciones de la cuenca de Oum-Er-Bia (OER), situada en el centro de Marruecos. Concluye que a escala diaria no se obtiene una buena correlación ($R = 0.2$) y un error medio cuadrático de $RMSE = 10$ mm; sin embargo, a escala mensual obtuvo un R de 0.8 y un $RMSE$ de 28 mm, mientras a escala anual sus resultados fueron un R de 0.71 y un $RMSE$ de 157 mm; por lo tanto, indica que la mejor fuente para esta cuenca es a escala mensual.

Ureña et al. (2018) realizó un análisis comparativo de los productos GSMaP, CHIRPS y GMET, para la cuenca Katari, cada uno con una resolución espacial y temporal diferente (2000-2016). Donde concluye su comparación haciendo un análisis solo de precipitación que los mejores

productos que podrían ser confiables son GMET y CHIRPS con datos en tierra realizando un ajuste entre estos productos.

Barbosa (2021) verificó que los productos satelitales CHIRPS y PERSIANN CCS con respecto a información de estaciones meteorológicas con el fin de realizar evaluaciones lluvia escorrentía en HEC HMS y comprobar el potencial de esta información para futuros análisis de sistemas de alerta temprana de inundaciones. Concluye diciendo que CHIRPS es el producto que mejor utilidad tendría para modelos predictivos en la zona incorporando una calibración de Monte Carlo para obtener mejores resultados.

1.1.2. Estudios a nivel nacional

Llauca et al., (2021) evaluaron la aplicabilidad y calidad de los productos de precipitación por satélite (PPS) en tiempo casi real para la simulación de la escorrentía sub-diaria en la cuenca del río Vilcanota, situada en el sureste de los Andes de Perú. Los resultados se evaluaron en cuanto al promedio de la métrica de Kling-Gupta (KGE); El producto GR4H_GSMaP-NRT' ha obtenido la mejor representación de las descargas horarias (0.686), seguido de GR4H_IMERG-E' (0.623), GR4H_Ensemble-Mean (0.617) y GR4H_CMORPH' (0.61), y GR4H_HE' (0.52). Concluyen que estos resultados ayudaran a implementar un servicio de alerta temprana en la cuenca y también beneficiará en el pronóstico hidrológico a corto plazo de las inundaciones.

Cuadros (2020) evaluó la utilidad la precipitación estimada por satélite para estimar la oferta hídrica en la subcuenca del río Pachachaca en el departamento de Apurímac. Los resultados muestran que los productos PISCOcorr presenta un NSE =0.85, PISCO un NSE = 0.73, y CHIRPS un NSE = 0.62, para la etapa de calibración, mientras que para la etapa de validación los resultados son, PISCOcorr un NSE = 0.53, PISCO un NSE = 0.61 y CHIRPS un NSE = 0.63.

Huamán (2018) en Huancavelica, determinó el desempeño del producto TRMM mediante la aplicación de un modelo distribuido TETIS, donde determinó la incidencia de los factores físicos de la precipitación en la respuesta hidrológica a través del proceso de calibración. Como resultado obtuvo un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 0.78, lo que califica como muy bueno; concluyendo que el producto TRMM puede usarse como fuente auxiliar para esta cuenca en enfoque distribuido.

Zubieta et al. (2018) en Puno, caracterizó las principales variables hidrológicas para conocer el potencial de las estimaciones de precipitación basadas en conjuntos de datos satelitales para la modelación hidrológica. Se utilizó el modelo conceptual GR2M para simular los caudales entre el periodo 2011-2015, para la cuenca del río Ilave; el autor concluye que el modelo GR2M tiene un mejor desempeño con los datos de entrada del producto TMPA-V7.

1.2. Definición de términos básicos

1.2.1. Precipitación

Chow et al., (2000) señala que la precipitación “incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre” (p. 35). Un concepto más general sería que las nubes por consecuencia del movimiento de las masas de aire acumulan gotas de lluvia, y cuando éstas se amplían precipitan a la superficie por su propio peso (Fattorelli & Fernández, 2007). De esta manera podemos definir la precipitación como el producto del vapor de agua que va hacia la atmósfera de forma líquida o sólida y luego precipita hacia la superficie de la tierra por su mismo peso.

1.2.2. Productos de precipitación estimada por satélite (PPES)

Las aplicaciones hidrológicas mediante percepción remota son cada vez más rutinarias, de este modo las estimaciones de precipitación en base a satélites resultan necesarias para evaluar y/o validar zonas con baja densidad de información en tierra; la alta resolución temporal y espacial de

muchos satélites resultan importantes (Joyce et al., 2004; Obando & Sarmiento, 2015). Debido a estos avances se pueden evaluar estos datos mediante modelos numéricos que impliquen utilizar la precipitación como dato de entrada (modelo hidrológico lluvia esorrentía), lo que pueden proporcionar información útil para la predicción y mitigación de futuros desastres en todo el mundo. A continuación, se describen algunos productos de precipitación estimada por satélite y derivados utilizados en la presente investigación:

a. El producto TRMM-3B42V7

Pertenciente al satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Huffman et al., 2007), genera datos diarios producto de la acumulación del producto 3B42 a una resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y una cobertura espacial de 50°N - 50°S (Macritchie, 2015), como lo muestra la **Figura 1**. La información disponible de este satélite es de 22 años desde el primero de enero 1998 hasta el 31 de diciembre del 20219. Estos datos son obtenidos a partir de muchos sensores de precipitación por satélite (en un conjunto de datos del TMPA: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_Daily_7/summary).

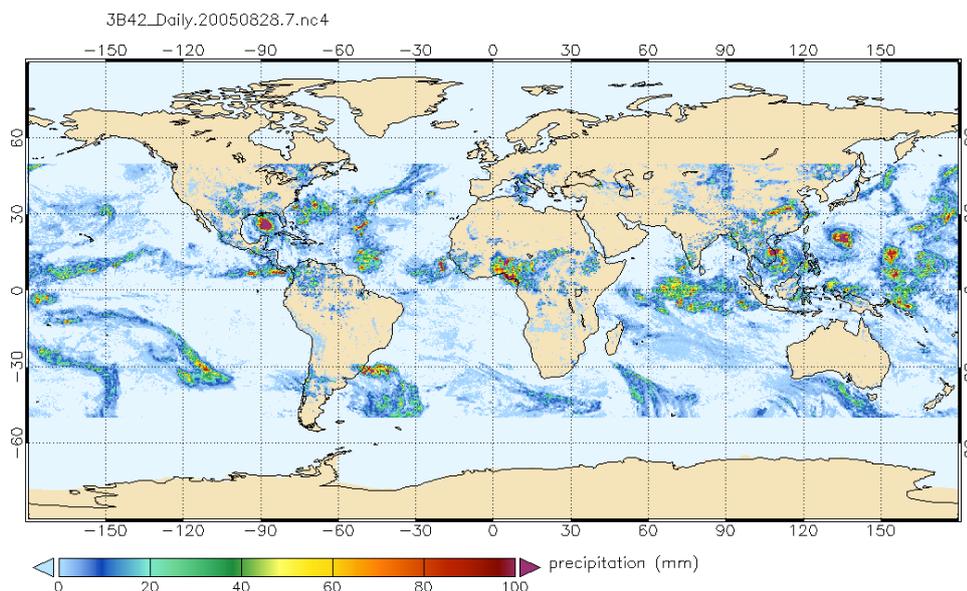


Figura 1: Imagen referencial del producto TRMM-3B42.

Nota: Imagen global de precipitación del año 2005/08/28. Recuperado de Nasa, 2015.

b. El producto IMERGDF

El Producto Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (**IMERG**) del satélite Global Precipitation Measurement (GPM), este satélite fue lanzado el 27 de febrero de 2014, iniciada principalmente por la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) como sucesor del TRMM (Huffman et. al, 2015); el producto IMERG combina información de los satélites GPM para estimar la precipitación abarcando gran parte de la tierra. Abarca una cobertura global de 65°N-65°S, y una escala espacial de 0.05° (**Figura 2**), brinda información cada 30 minutos. Es valioso en zonas que carece de instrumentos de medición en tierra, funciona las estimaciones obtenidas del satélite TRMM (2000 - 2015) con las estimaciones hasta la actualidad del producto y está definido en tres periodos de latencia.

El producto IMERG utiliza sensores de microondas pasivas (PMW) para intercalar las estimaciones de precipitación. Sin embargo, debido al limitado muestreo de estos sensores se completan con estimaciones en el rango infrarrojo (IR).

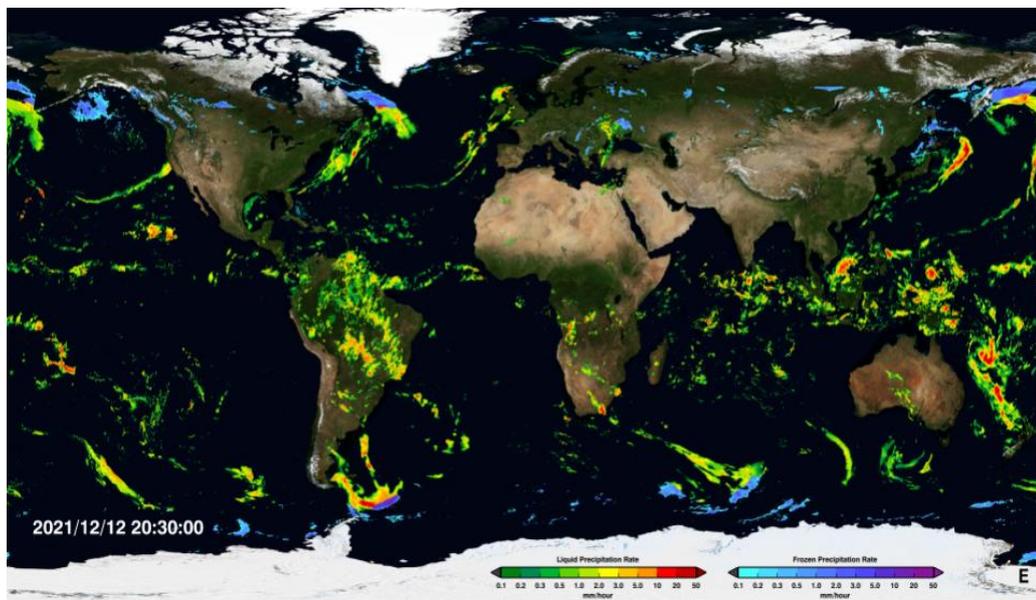


Figura 2: Imagen referencial del producto IMERG.

Nota: Imagen del 12 de diciembre del 2021, obtenida de <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>.

c. El Producto CMORPH

Por otro lado, el algoritmo **CMORPH** (CPC MORPhing Technique) produce un análisis de precipitación global a una alta resolución espaciotemporal que combina información de diferentes satélites con sensores de microondas a intervalos de media hora, esta información proviene de imágenes satelitales geoestacionarias el cual usa la forma e intensidad de lluvia para brindar esta información. Esta técnica proporciona estimaciones de lluvia a una escala espacial de 60°S – 60°N a una grilla de 0,25°x0,25° 25 km de píxel aproximadamente, esta información esta disponibles a partir de diciembre del 2002 hasta la actualidad (Joyce et al., 2004).

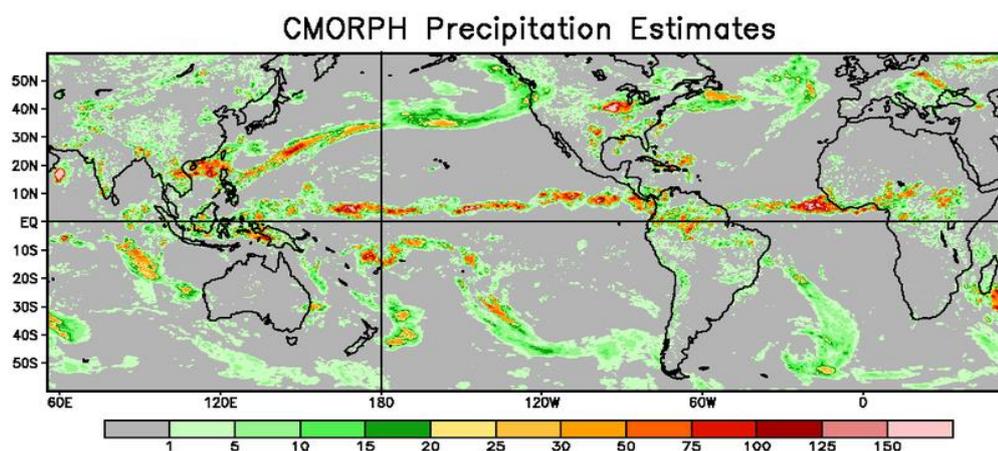


Figura 3. Imagen referencial del producto CMORPH.

Nota: Estimación de precipitación diaria en mm/día para la fecha 2 de junio del 2010. Obtenido de Ferraro & Smith, Global Precipitation Monitoring, 2015.

d. El Producto CHIRPS

De igual manera el producto The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (**CHIRPS**) está basado en diferentes técnicas de interpolación “inteligentes”, esta técnica estima precipitaciones de alta resolución basadas en observaciones infrarrojas de nubes frías (Cold Cloud Duration, CCD) en un periodo de largo plazo. Proporciona estimaciones a una escala cuasi-global de (50°N-50S°, ver **Figura 4**), a una resolución espacial de 0.05° de grilla, a escala temporal diaria y mensual. CHIRPS

utiliza las estimaciones de precipitación del producto 3B42V7 del satélite TRMM para calibrar el “Cold Cloud Duration” (CCD) (Funk et al., 2015).

El algoritmo incorpora datos diarios, pentadales y mensuales desde 1981 hasta la fecha, combina los datos de las estaciones para obtener un producto de información preliminar con una periodicidad/latencia de unos 2 días y un producto final con una periodicidad/latencia media de unas 3 semanas, y iv) utiliza un procedimiento de mezcla de niveles que incorpora la estructura de correlación espacial de las estimaciones de la CCD para asignar pesos de interpolación (Funk et al., 2015).

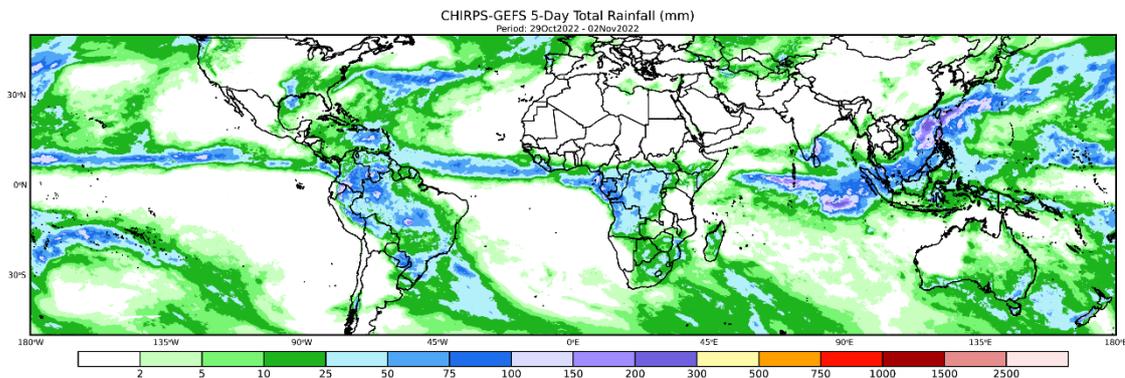


Figura 4. Imagen referencial del producto CHIRPS.

Nota: Primer cuadro se muestra el proceso y validación para la obtención del producto CHIRPS, y finalmente su aplicación. Obtenido de (Funk et al., 2015).

Productos derivados de productos precipitación estimada por satélite (PPES)

e. El Producto PISCO

El conjunto de datos **PISCO** por sus siglas en inglés (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) es el resultado de la combinación de productos satelitales con datos in situ, la información disponible está a escala diaria o mensual, se realizó un reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial ($0.10^{\circ} \times 0.10^{\circ}$). Estos datos están disponibles para el periodo 1981-2016 (Aybar et al., 2019).

Para generar este producto realizaron una interpolación entre los datos CHIRPS diarios y la información de su red de 370 estaciones a nivel nacional, mediante las técnicas “Inverse Distance Weighting” (IDW), “Kriging with External Drift” (KED) y “Regression Inverse Distance Weighting” (RIDW).

Esta información se encuentra disponible en la biblioteca de datos del Instituto Internacional de Investigaciones de la Universidad de Columbia en el siguiente enlace:

<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/index.html?Set-Language=es>

f. El Producto RAIN4PE

El producto RAIN4PE (Fernandez-Palomino et al., 2022), es un nuevo conjunto de datos de precipitación diaria en cuadrícula obtenido mediante la fusión de datos de precipitación de múltiples fuentes de precipitación (Precipitación infrarroja del Grupo de Riesgos Climáticos por satélite, CHIRP (Funk et al. 2015), reanálisis ERA5 (Hersbach et al. 2020), y la precipitación en tierra) con la elevación del terreno utilizando el método de regresión de bosque aleatorio. Además, RAIN4PE se corrige hidrológicamente utilizando datos de caudales en cuencas con subestimación de la precipitación a través de la hidrología inversa. Por lo tanto, RAIN4PE es el único producto de precipitación cuadrículada para Perú y Ecuador, que se beneficia de las máximas observaciones in situ múltiples fuentes de precipitación, datos de elevación, y se complementa con datos de flujo de agua para corregir la subestimación de la precipitación en los páramos y las cuencas montañosas. Los datos de RAIN4PE están disponibles para la superficie terrestre entre 19°S-2°N y 82-67°W, con una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 0.1° x 0.1°, con disponibilidad de datos para el periodo 1981 -2015. El conjunto de datos de precipitación se proporciona en formato NetCDF.

1.2.3. Sistema hidrológico

La complejidad de los fenómenos hidrológicos es difícil de entender, sin embargo, estos fenómenos pueden representarse de una manera simplificada en un sistema que tiene como componentes a la precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico, y puede considerarse como un sistema representativo del mismo (Mejía, 2006). Por lo tanto, podemos entender como sistema hidrológico al conjunto de elementos dentro del ciclo hidrológico que actúan como un todo, tal como se muestra en la **Figura 5**.

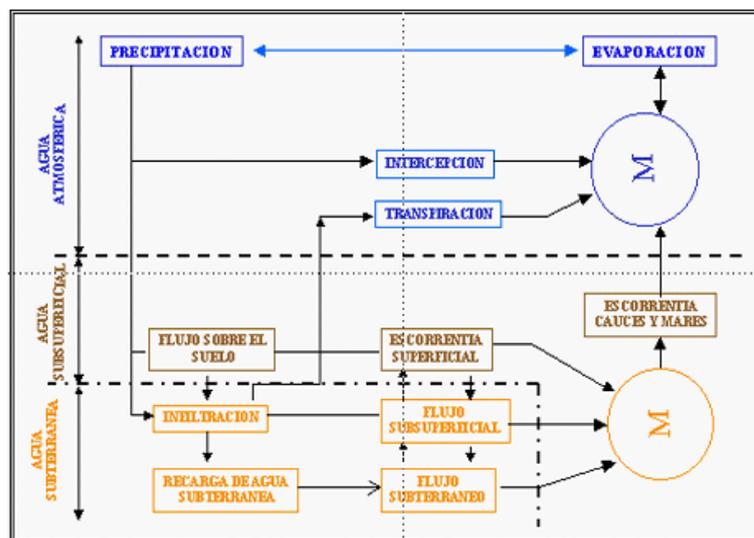


Figura 5: Composición de un sistema hidrológico

Fuente: Obtenido de Estrela (1992).

i. Modelación hidrológica

Gutiérrez (2014) indica que “los modelos hidrológicos sirven para: reconstrucción y regeneración de series de datos, estimación de caudales, previsión de eventos extremos, gestión de embalses, simulación de transportes de contaminantes, simulación del acuífero” (p. 41). Los modelos hidrológicos son herramientas que representan los procesos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica y así poder predecir las consecuencias que se puedan generar con relación a los valores observados (Tucci, 2005).

Los modelos hidrológicos realizan la representación del sistema hidrológico a través de un conjunto de ecuaciones con el objetivo de poder simular los fenómenos que ocurren en la realidad; estos modelos permiten predecir con fundamento teórico científico, posibles eventos hipotéticos en la zona de estudio; estos modelos no son perfectos, pero estos errores se pueden minimizar mediante un proceso de calibración y validación adecuada (Cabrera, 2012; Giai, 2008).

1.2.4. Modelo hidrológico conceptual GR4J

El modelo GR4J (“Génie Rural á 4 paramètres Journalier”) fue desarrollado en Francia y mejorado por Perrin et al. (2003), el cual está basado en el modelo GR3J de Edijatno et al. (1999). Es un modelo conceptual de 4 parámetros (**Figura 6** y **Tabla 1**), y de tipo agregado, normalmente es aplicado a cuencas hidrográficas no evaluadas.

Este modelo como variables de entrada necesita la precipitación areal de la cuenca y la evapotranspiración potencial (ETP), y para su calibración se necesitará de una serie histórica de caudales en el punto de aforo de la estación hidrométrica El Tigre la cual ha sido considerado como límite para la delimitación de la cuenca.

Para esta investigación se utilizó el paquete airGR (Coron et al., 2017) en lenguaje R. Este paquete fue desarrollado por el Grupo de hidrología de Captación de INRAE (Francia) e incluye los modelos lluvia-escorrentía GR.

i. Descripción matemática del modelo

Este modelo cuenta con dos reservorios (**Figura 6** y **Tabla 2**), el primer reservorio es el reservorio de producción (S) y el segundo reservorio de tránsito (R, no lineal), Q_d se denota como el caudal de escorrentía directa a través de un hidrograma unitario simple (UH); Q_r se denota como la escorrentía subsuperficial, mediante un hidrograma unitario que se almacena en el reservorio lineal; Q_{tot} es la escorrentía total de la suma de $Q_r + Q_d$.

$$E_s = S * \quad (3)$$

De tal manera el contenido del agua en el suelo quedará denotada de la siguiente manera:

$$S = S - E_s + P_s \quad (4)$$

$$0 \leq S \leq X1(mm) \quad (5)$$

Entonces la percolación (*Perc* en *(m/d)*) hacia la zona saturada esta detonada de la siguiente manera:

$$Perc = S \left\{ \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 X1} \right)^4 \right]^{-0.25} \right\} \quad (6)$$

$$0 \leq Perc \leq S \quad (7)$$

Contenido de agua en el suelo (*S* en *(m/d)*):

$$S = S - Perc \quad (8)$$

La escorrentía total *Pr* en *(m/d)* después de transitada hasta la desembocadura de la cuenca:

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \quad (9)$$

Pr se divide en dos componentes de flujo **Q1** (escorrentía directa); el 10% de *Pr* se transita a través de un hidrograma unitario simple (UH2); en la escorrentía subsuperficial (**Q9**), el 90% restante de *Pr* se transita a través de un hidrograma unitario (UH1) y un posterior reservorio no lineal.

De tal manera el cálculo del intercambio de agua subterráneo (*F* en *(m/d)*) se denota en la siguiente función:

$$F = X2 * \left(\frac{R}{X1} \right)^{7/2} \quad (10)$$

F : función de intercambio dependiente de X_2

$X_2 > 0$: importación de agua

$X_2 < 0$: exportación de agua

$X_2 = 0$: no hay intercambio

Ecuación del reservorio de tránsito no lineal (R) y del Caudal de salida (Q_r en (m/d)):

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (11)$$

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-0.25} \right\} \quad (12)$$

$$0 \leq Q_r < R \quad (13)$$

De tal manera se actualiza el nivel en el reservorio (R) en (m) :

$$R = R - Q_r \quad (14)$$

Finalmente obtendremos el Caudal total a la desembocadura de la cuenca (Q_{tot} en (m^3/d)):

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (15)$$

$$Q_{tot} = Q_r + Q_d \quad (16)$$

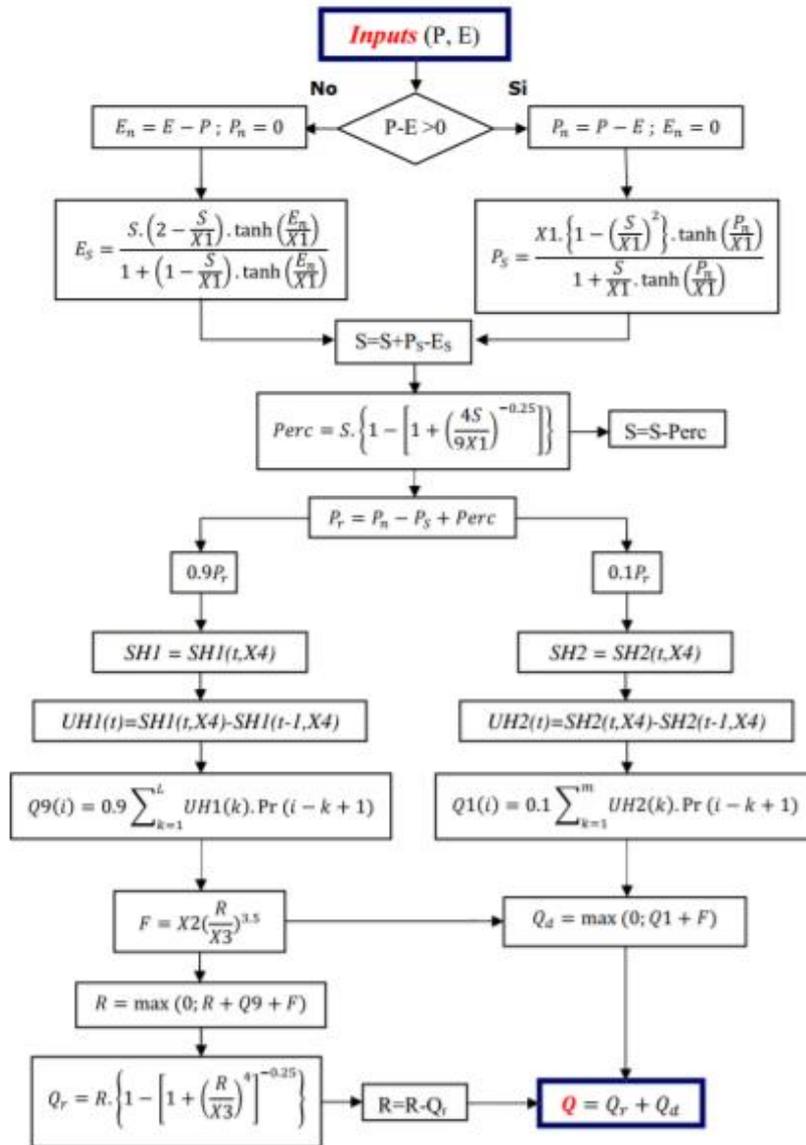


Figura 7: Flujograma del Detalle Matemático del Modelo GR4J

Nota: Q es el caudal total a la desembocadura de la cuenca. Obtenido de (Mostafaie et al., 2018 ; adaptado por Fuertes, 2020)

Los parámetros utilizados por este modelo se muestran a continuación; cabe destacar que estos parámetros serán modificados en la fase de calibración, hasta obtener un valor óptimo para el modelo de acuerdo con la función objetivo establecida.

Tabla 1. *Parámetros del modelo GR4J, usados en esta investigación.*

Parámetro	Descripción	Unidad	Rango
X1	Capacidad de almacenamiento de producción.	mm	[0,1200]
X2	Coeficiente de intercambio de agua.	mm	[-100, 100]
X3	Capacidad de depósito de laminación.	mm	[0, 5000]
X4	Tiempo base del hidrograma unitario.	d	[0, 5]

Nota: Estos parámetros han sido modificados según aplicaciones de diferentes rangos en diversos estudios realizados utilizando el modelo GR4J.

Tabla 2. *Condiciones iniciales del modelo GR4J*

Parámetro	Descripción	Unidad	Rango
Slni	Capacidad inicial del depósito de producción.	mm	[0.01, 1.2]
Rlni	Nivel inicial de agua en el depósito de enrutamiento	mm	[-0.005 ,0.003]

Fuente: Perrin et al., (2003).

1.2.5. Calibración del modelo hidrológico

Cabrera (2012) define la calibración como el proceso por el cual los parámetros del modelo se ajustarán de forma óptima de tal manera que las salidas o simulaciones del modelo se acerquen a la serie de datos observados, valiéndose de diferentes herramientas estadísticas que permitan minimizar el sesgo de error entre ambos grupos de datos. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos no existe un modelo que simule perfectamente la respuesta hidrológica en una cuenca debido a la incertidumbre que existen en las distintas componentes del sistema hidrológico, por lo que calibrar el modelo es imprescindible para obtener un adecuado comportamiento referente al modelo hidrológico (Ponce, 1989).

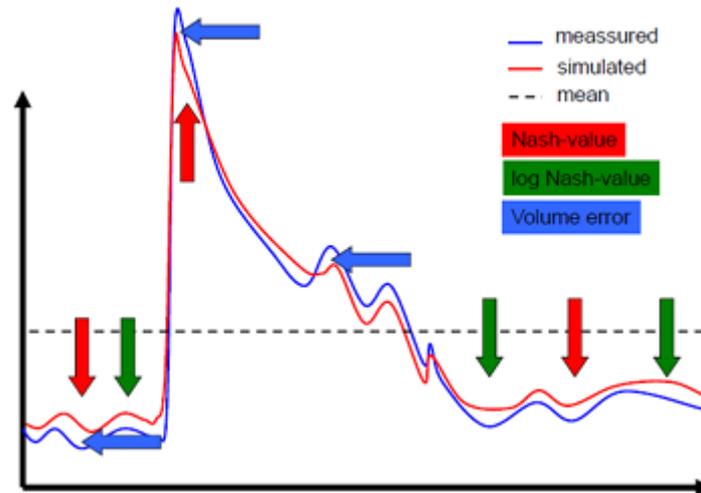


Figura 8: Medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo hidrológico

Fuente: obtenido de (Finger, 2011; como se citó en Cabrera, 2012).

Refsgaard & Knudsen (1996) define la **validación** “como la etapa de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración” (citado por Aybar Camacho, 2016).

De esta manera podemos decir que el modelo se ha validado si su precisión y/o capacidad predictiva en esta etapa muestra errores aceptables.

1.2.6. Firmas hidrológicas

Las firmas hidrológicas (índices que caracterizan el comportamiento hidrológico) describen las propiedades estadísticas o dinámicas de las series de datos hidrológicas, principalmente del caudal (por ejemplo, el comportamiento entre el almacenamiento y la descarga). Están siendo utilizadas en esta última década para entender la variabilidad espaciotemporal de la respuesta hidrológica en una cuenca, también para la clasificación de cuencas, la exploración de procesos hidrológicos y la calibración de modelos hidrológicos, así como también evaluar la confiabilidad a largo plazo de los productos satelitales (Addor et al., 2018; Jehn et al., 2019; McMillan, 2021). Sin embargo, el reciente aumento de la popularidad y el número de firmas no ha ido acompañado del desarrollo de una orientación clara sobre la selección de estas (Addor et al., 2018).

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2. Información, equipos y programas

2.2.1. Recopilación de datos

a) Precipitación medida de las estaciones meteorológicas

La información observada (in situ) para la cuenca fue obtenida mediante las entidades correspondientes de cada país, en este caso el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI).

Se recopiló información de lluvia acumulada diaria de 16 estaciones meteorológicas que cubrían gran mayoría del área de la cuenca, con un porcentaje de cobertura de datos mayor al 50%, con el fin de no perder distribución espacial en la cuenca (**Figura 14**), en la **Tabla 3** se describen las estaciones utilizadas.

Tabla 3. *Relación de las estaciones meteorológicas seleccionadas en la cuenca del río Puyango-Tumbes.*

Estación	Abreviatura	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [msnm]	Entidad Operativa
El Tigre	ETIG	-80.45	-3.77	61.00	SENAMHI
Matapalo	MPLO	-80.20	-3.68	70.00	SENAMHI
Rica Playa	RPLA	-80.46	-3.81	113.00	SENAMHI/ANA
Cabo Inga	CING	-80.43	-3.97	205.00	SENAMHI/ANA
Cazaderos	CAZD	-80.48	-4.09	238.00	INAMHI
Chaguaguayco	CGYC	-80.32	-4.02	285.00	INAMHI
Puente Puyango	PTPG	-80.08	-3.88	305.00	INAMHI

«continuación»

El Salado	ESAL	-79.64	-3.75	570.00	INAMHI
Balsas	BALS	-79.82	-3.76	693.00	INAMHI
Portovelo	PORT	-79.62	-3.71	747.00	INAMHI
Buenavista	BVIS	-79.72	-3.89	1062.00	INAMHI
Zaruma	ZARU	-79.61	-3.70	1100.00	INAMHI
Piñas	PÑAS	-79.70	-3.68	1126.00	INAMHI
Salati	SALT	-79.53	-3.75	1173.00	INAMHI
Chaguarpamba	CGUP	-79.64	-3.87	1334.00	INAMHI
Alamor	AMOR	-80.03	-4.02	1250.00	INAMHI

b) Datos de PPES

La información de los productos de precipitación estimada por satélite fue recolectada de cada servidor en la cual están almacenados los datos (libre acceso). Los enlaces de acceso se presentan en el CAPÍTULO I.

Tabla 4. *PPES seleccionados en la cuenca Puyango - Tumbes.*

Productos	Versión	Cobertura temporal	Resolución Temporal	Resolución espacial	Institución	Referencia
PISCOpd	V2p1	1981-01-01 a 2016-12-34	diaria	0.1° x 0.1°	SENAMHI	Aybar et al. (2017)
RAIN4PE	V1.0	1981-01-01 a 12/31/2015	diaria	0.1° x 0.1°	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)	Fernandez-Palomino et al. (2021)
IMERGDF	V6.0	2000-06-01 a 9/30/2021	diaria	0.1° x 0.1°	NASA	Huffman & Bolvin (2017)
TRMM-3B42V7	V7.0	1998-01-01 a 2019-12-31	diaria	0.25° x 0.25°	NASA	Huffman et al. (2017)

«continuación

CMORPH	V1.0	1998-01-01 a 2020-12-32	diaria	0.25° x 0.25°	NOAA/CPC	Xie et al. (2019)
CHIRPS	V2.0	1981-01-01 a 2020-12-33	diaria	0.05° X 0.05°	UCSB/CH G	Funk et al. (2014)

c) Evapotranspiración potencial

El subproducto PISCOpet_d quien se deriva del subproducto PISCOtm_d siguiendo la metodología propuesta por Hargreaves and Samani(1985). El conjunto de datos de PISCOpet_d está disponible gratuitamente en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO> (consultado el 11 de julio de 2022).

d) Datos hidrométricos

Esta información de igual forma ha sido recolectada del portal del observatorio del Agua, SNIRH-ANA: <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/> y los caudales por parte de Ecuador, han sido otorgados por el INAMHI, en la **Tabla 5** se muestran las estaciones hidrométricas utilizadas. El periodo de consideración es desde 1981-01-01 hasta el 2015-12-31, en la **Figura 9** se muestra la cobertura de datos existentes en estas estaciones.

Tabla 5. *Relación de estaciones hidrométricas seleccionadas en la cuenca Puyango – Tumbes.*

Estación	Abreviatura	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [msnm]	Entidad Operativa
El Tigre*	ETI	-80.46	-3.77	40.00	SENAMHI/PEBPT
Puyango en CPTO. Militar*	PCM	-80.08	-3.88	300.00	INAMHI
Marcabeli AJ Puyango	MAP	-79.93	-3.81	450.00	INAMHI

«continuación»

Puyango AJ Marcabeli	PAM	-79.93	-3.82	360.00	INAMHI
Moromoro en Moromoro	MMO	-79.74	-3.69	800.00	INAMHI
Pindo AJ Amarillo*	PAA	-79.64	-3.76	520.00	INAMHI
Amarillo en Portovelo	AEP	-79.61	-3.71	660.00	INAMHI
Calera AJ Amarillo	CAM	-79.64	-3.68	680.00	INAMHI

Nota: (*) Estaciones utilizadas para la calibración del modelo.

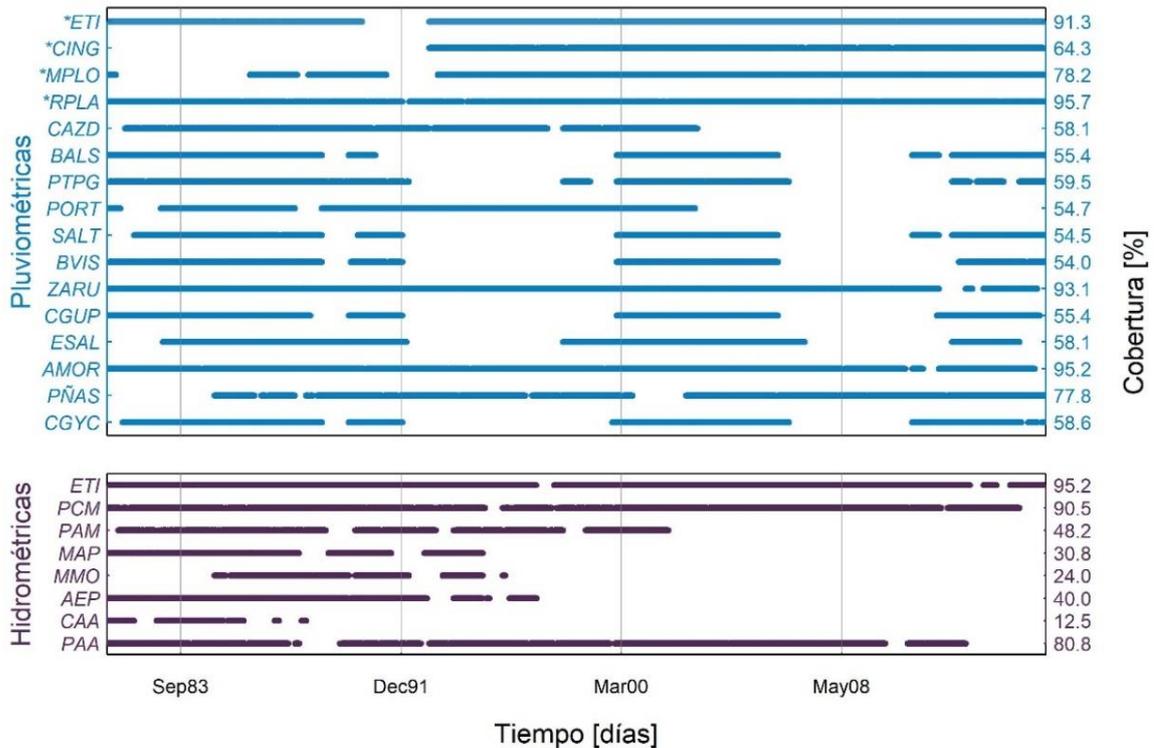


Figura 9: Cobertura de datos hidrometeorológicos en la cuenca Puyango - Tumbes.

Complementariamente a la descarga se realizó un análisis exploratorio visual de los hidrogramas observados en las estaciones hidrométricas en la cuenca Puyango-Tumbes. Este análisis permitió detectar valores atípicos, los cuales se removieron y fueron reemplazados por NaNs (sin datos) para evitar errores en la calibración del modelo hidrológico.

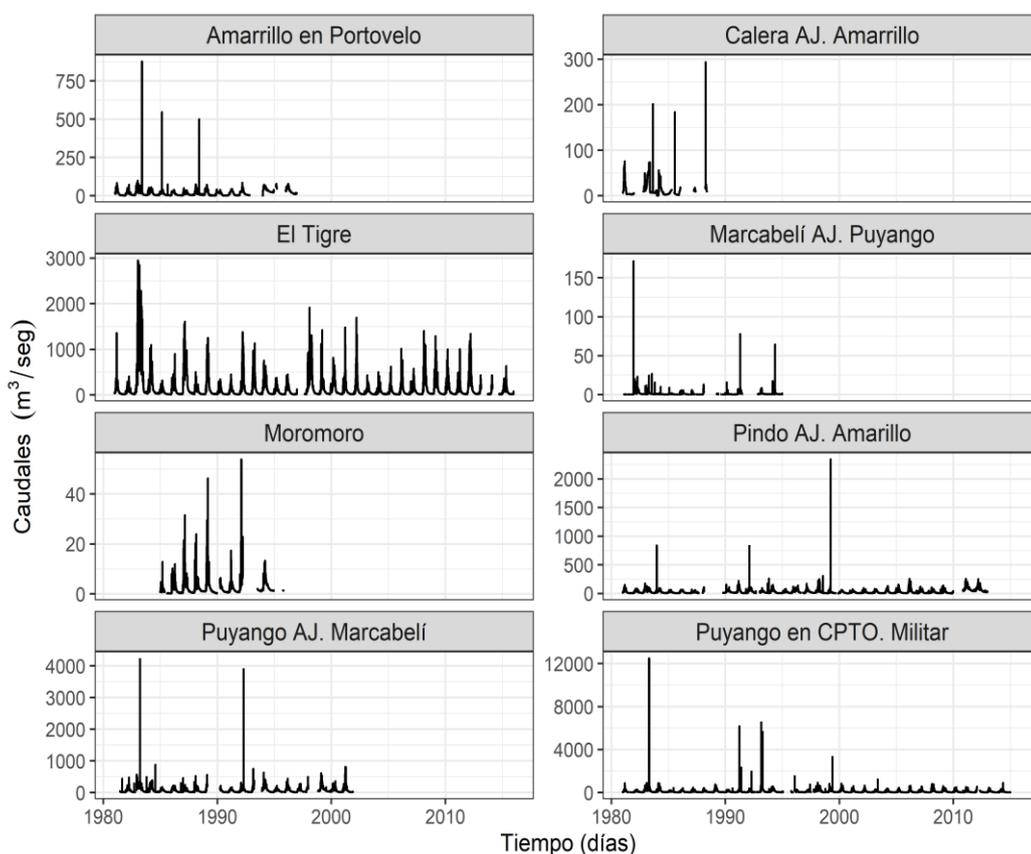


Figura 10. Caudales medios diarios disponible para el periodo 1981 - 2015, con valores atípicos, obtenidos de SENAMHI e INAMHI.

2.2.2. Materiales y equipos

Para el desarrollo de la presente tesis se hizo uso de los siguientes materiales y equipos descritos en la **Tabla 6** y, en la **Tabla 8** se describe la información geográfica y satelital necesaria para esta investigación.

Tabla 6. *Materiales y equipos utilizados*

Materiales	Equipos
Cuadernillo para elaboración de metodología y recolección de información en internet.	Laptop. Disco duro 500GB.

Tabla 7. *Características del equipo de computo*

Equipo	Detalles computacionales
Laptop ASUS TUF gaming F15	Procesador AMD Ryzen 5 2.1 GHz, memoria RAM 8GB, tarjeta de Video dedicada RX RADEON RTX 560 de 4GB y Disco SSD 124GB y HDD de 1Tera.

Tabla 8. *Información geográfica necesaria*

Material Geográfico	Fuente
DEM (Digital Elevation Model) 12.5 x 12.5 m de resolución.	ALOS PALSAR – JAXA https://search.asf.alaska.edu/#/

2.2.3. Programas

El manejo de la información obtenida para su análisis se realizó mediante los siguientes softwares detallados en la siguiente **Tabla 9**.

Tabla 9. *Softwares utilizados para la realización del proyecto.*

Software	Descripción
Lenguaje de Programación R x64 v4.1.1	Se utilizará para realizar el modelamiento hidrológico GR4J mediante el paquete airGR y realizar el análisis estadístico de los diferentes productos satelitales.
Quantum GIS x64 v3.16.13	Para la delimitación de la cuenca y elaboración temática de los mapas para la presentación en la investigación.

2.2.4. Ubicación del área de estudio

La cuenca del río Puyango - Tumbes se ubica en las provincias de El Oro y Loja en la República del Ecuador y en el departamento de Tumbes en la República del Perú. Geográficamente, el área de la cuenca se halla entre las coordenadas 4.25°S –

3.48°S y 80.67°W - 9.38°W, datum WGS84 (ANA, s.f). El área superficial de la cuenca es de 4 850 km². De ellas, solo 1 806 km² se encuentran en territorio peruano. La cuenca emerge en los páramos de Chilla y Cerro Negro, a una altura de 3500 m.s.n.m., donde se le otorga por nombre de río Pindo. A partir de su confluencia con el río Yaguachi cambia de nombre a río Puyango. 100 km aguas abajo, el río Puyango recibe a la quebrada Cazaderos para formar el río Tumbes.

En este trabajo se definió un dominio de estudio representativo para la extracción, procesamiento y evaluación del sesgo de los PPES diarios, entre el rango de latitudes sur 3.2°S - 4.5°S, y longitudes oeste 79°W - 81°W. Para fines de la modelación hidrológica en un enfoque semidistribuido usando el modelo GR4J (**Figura 6**), se ha delimitado la cuenca hasta la estación El Tigre, donde el área total de la cuenca es de 4735.334 km², una pendiente media de 20.10° y una elevación media 1040.39 m.s.n.m. La precipitación media anual en la cuenca varía entre 400 – 1800 mm/año; Para delimitación de las subcuencas se consideró la ubicación de las estaciones hidrométricas como puntos de salidas (outlets) para algunas subcuencas, teniendo como resultado un total de 24 subcuencas y 24 tramos de ríos. En la tabla 10 se muestran los detalles fisiográficos de cada subcuenca.

Con los parámetros calculados para los tramos de río se tiene que la pendiente varía entre 0.001 – 0.05 m/m, la longitud total de cada tramo de río va desde los 2 – 38 km. La **Figura 12** muestra la variación altitudinal existente entre cada subcuenca ordenada de menor a mayor.

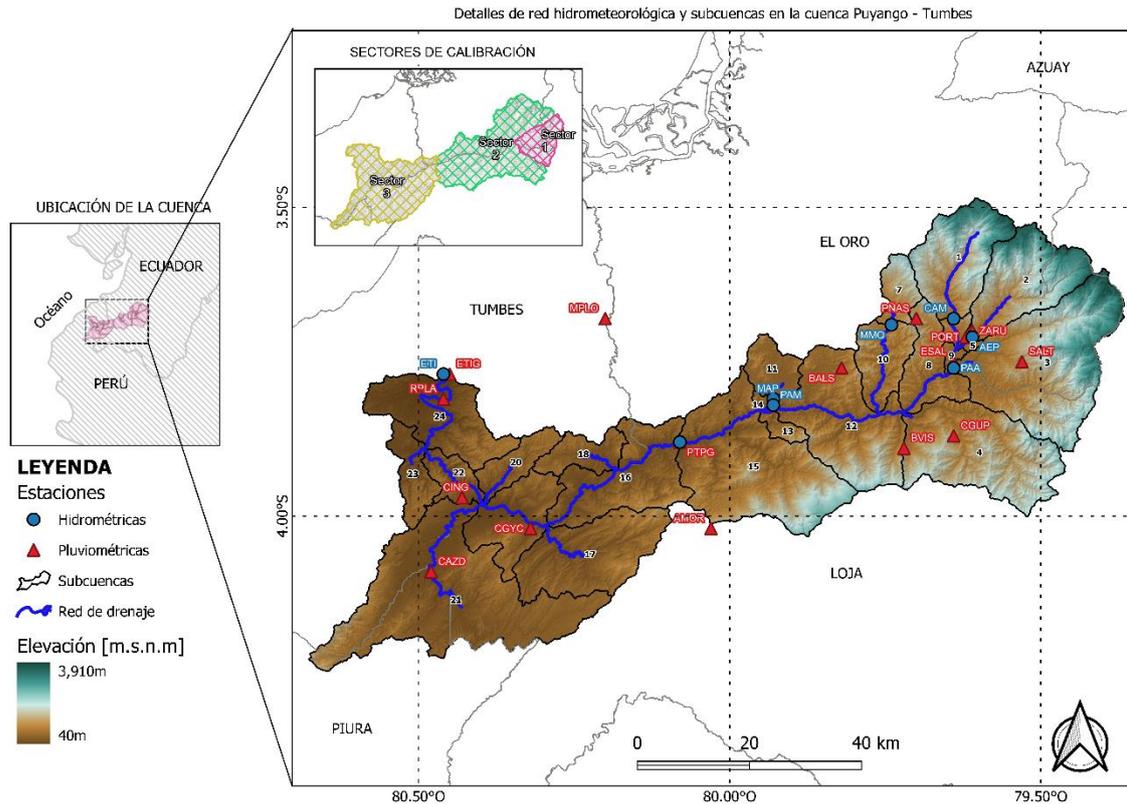


Figura 11. Ubicación del área de estudio, delimitación de subcuencas, tramos de ríos, red de estaciones hidrometeorológicas y sectores de calibración.

Tabla 10. Principales parámetros fisiográficos de las subcuencas y tramos de río

Subcuenc a	Estación *	Cuencas			Cauce	
		Área [km ²]	Elevación media [msnm]	Pendient e media [°]	Longitu d del río [km]	Pendiente media del río [m]
1	CAA	239.0	1982.04	24	20.31	0.054
		4				
2	AEP	249.2	2120.22	25	11.43	0.031
		1				
3	PAA	511.2	1846.97	24	4.09	0.009
		4				
4	-	384.9	1426.75	25	2.05	0.024
		7				
5	-	9.29	787.97	16	3.92	0.016

6	-	20.99	949.41	20	6.50	0.016
7	MMO	66.25	1438.54	18	4.87	0.020
8	-	135.7 5	962.96	23	14.50	0.001
9	-	13.99	757.21	20	5.47	0.007
10	-	124.4 1	970.89	24	23.94	0.016
11	MAP	79.11	697.10	17	5.17	0.005
12	PAM	361.1 2	993.34	22	28.38	0.001
13	-	27.44	857.29	23	2.54	0.001
14	-	8.66	658.09	22	4.16	0.028
15	PCM	499.7 5	1052.59	21	19.24	0.001
16	-	274.5 4	564.65	19	37.56	0.002
17	-	297.8 1	626.52	18	15.21	0.019
18	-	84.46	591.71	16	9.33	0.010
19	-	177.4 8	505.36	16	14.45	0.002
20	-	81.36	641.78	19	12.85	0.017
21	-	681.9 1	560.37	14	37.28	0.002
22	-	68.31	469.31	24	19.74	0.001
23	-	89.98	447.06	15	5.07	0.018
24	ETI	246.1 9	353.77	16	32.26	0.001

Nota: (*) Estaciones hidrométricas a la salida de cada subcuenca.

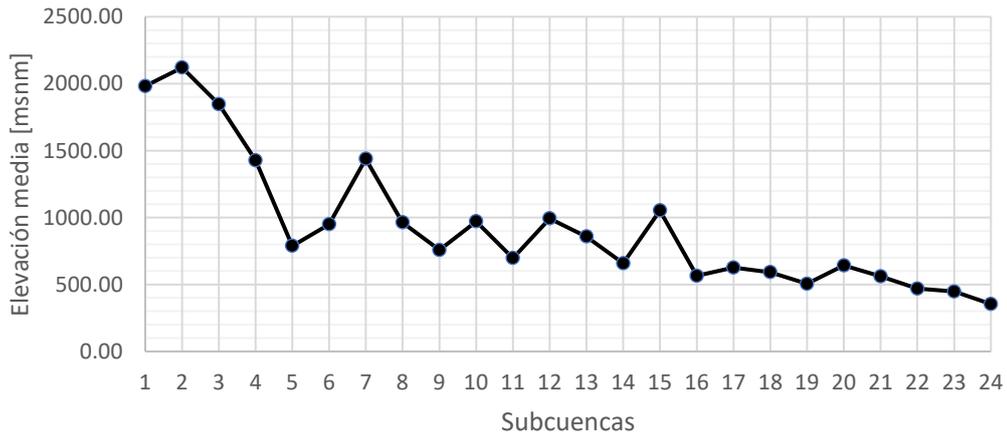


Figura 12. Variación altitudinal de las subcuencas delimitadas.

2.3. Metodología

En este apartado de la investigación se detalla los procedimientos realizados, entre las técnicas aplicadas en función de cada objetivo específico. En la **Figura 13** se representa el flujo de trabajo seguido para cada proceso en la investigación.

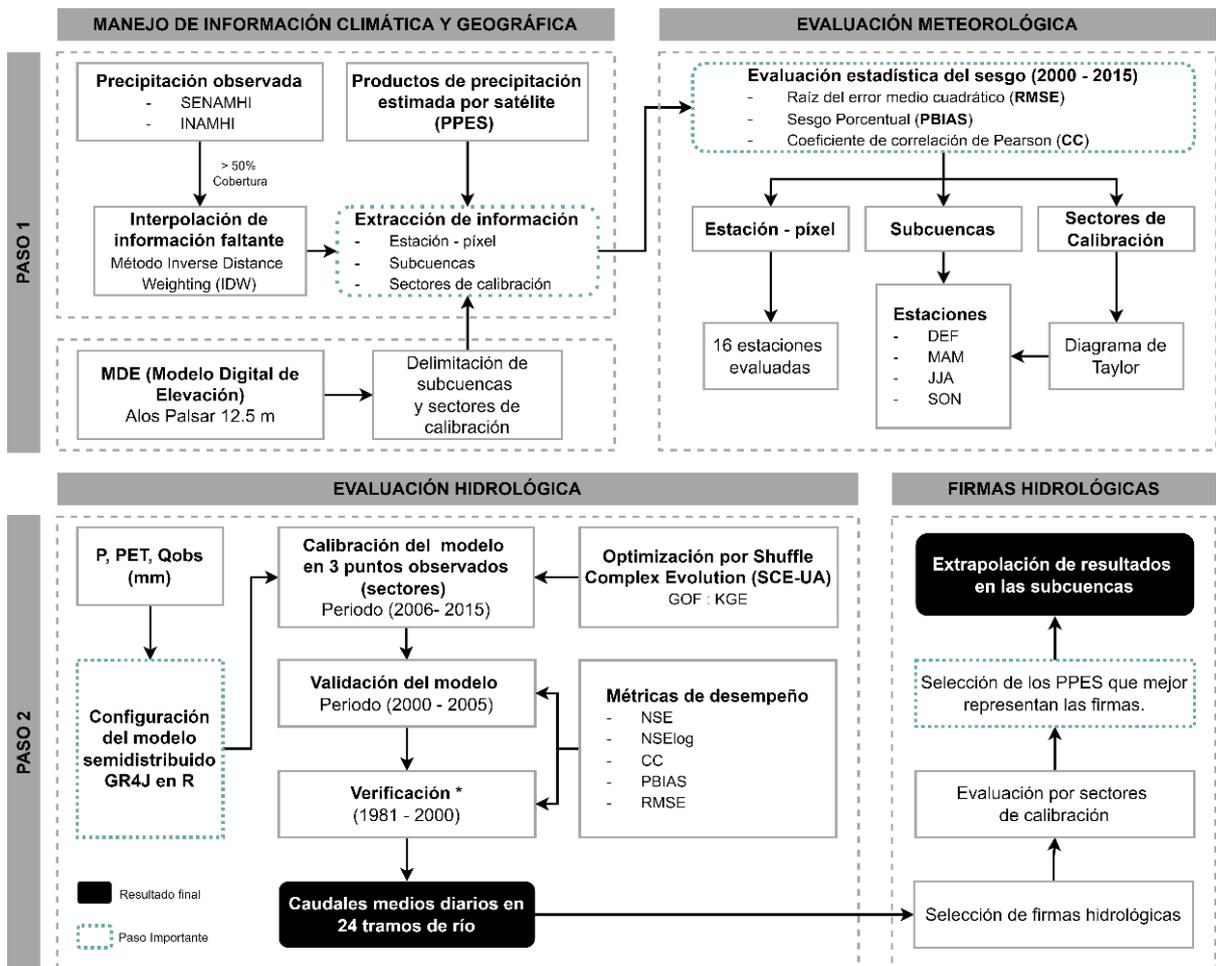


Figura 13: Flujo de trabajo de la metodología empleada.

Nota: P: Precipitación media, PET: Evapotranspiración potencial media, Qobs: Caudales medios diarios observados, GOF: Goal Objective Function (Función objetivo), DEF: Diciembre-Enero-Febrero, MAM: Marzo-Abril-Mayo, JJA: Junio-Julio-agosto, SON: Setiembre-October-Noviembre.

2.3.1. Manejo de información climática grillada y geográfica

A. Información observada de precipitación

Los datos obtenidos directamente de los servicios nacionales de meteorología e hidrología de cada país, estos datos no se les ha realizado tratamiento de la información, pero estos ya pasan por un control de calidad previo al ser entregados. Para encontrar la precipitación media en cada subcuenca se utilizó el método Inverso de la Distancia Ponderada (IDW).

La selección del 50% de datos se hizo con la finalidad de no quedarnos sin estaciones distribuidas en el espacio, tal como se muestra en la **Figura 14**, la interpolación uso los datos existentes en ese día (datos disponibles), si una estación no contaba con datos para poder interpolar entonces esa estación no era tomada en cuenta para interpolar los valores de ese día, mas no era eliminada la estación.

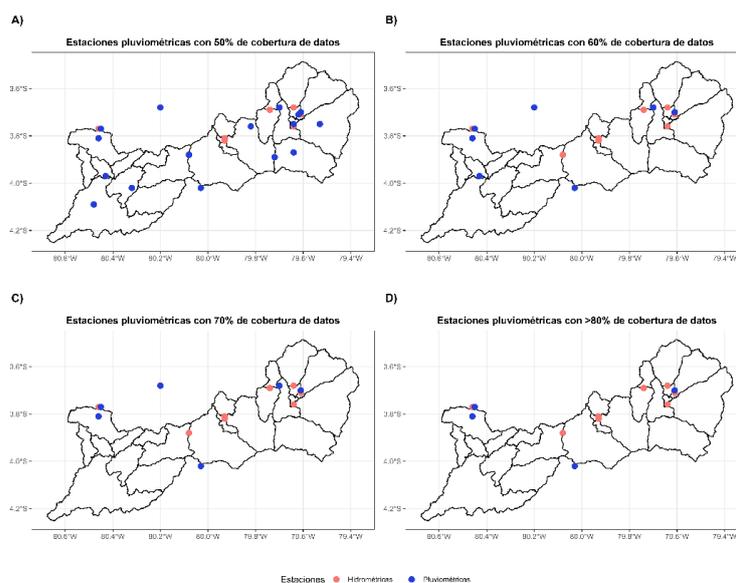


Figura 14: Distribución espacial de la obertura de datos en la cuenca Puyango – Tumbes.

B. Información de PPES

Como etapa preliminar de los datos descargados en formato NetCDF, se realizó un preprocesamiento que consistió en recortar la información global (para el caso de los productos satelitales globales) y la información de los productos derivados (que es el caso de los productos a escala nacional) a un mismo dominio de estudio (Lon. máx.: 81.00°W; Lon. min: 78.99°W; Lat. máx.: 4.50°S; Lat. min: 3.24°S) y corrección de unidades para transformar la información en unidades de mm/d. Finalmente para poder comparar de manera equitativa se realizó para el mismo periodo común de datos (2010 – 2015) y se remuestrearon a una misma resolución espacial de 0.1° x 0.1°. En el **Anexo 7** se muestra la precipitación media anual observada (usando IDW) y estimada a través de los PPES procesados para la cuenca Puyango - Tumbes.

C. Información geográfica

Debido a la resolución espacial con la que se contaban los PPES de 0.1° x 0.1°, es que la delimitación de las unidades de respuesta hidrológica, se realizó cuidando de que no sean tan pequeñas (a no ser que esto sea inevitable) utilizando un DEM de 12.5 m de resolución a partir de información SAR del producto Alos Palsar; dicha delimitación se utilizó el complemento para modelación hidrológica en QGIS llamado QSWAT; para el caso de los sectores de calibración su discretización fue simple, debido a que se consideró delimitarlas en aquellas estaciones donde se realizaría la calibración del modelo hidrológico posteriormente, son 3 estaciones con la que se tiene datos para poder calibrar (coincidentemente distribuidas en parte alta, media y baja de la cuenca) y es por ello que se tiene 3 sectores de calibración. La **Figura 11** muestra las subcuencas delimitadas, los tramos de ríos y los sectores de calibración elegidos para la zona de estudio.

2.3.2. Evaluación estadística del sesgo

Esta fase se ha realizado en tres niveles de evaluación:

- (A) Evaluación meteorológica a nivel estación-píxel.
- (B) A nivel de subcuencas.
- (C) A nivel de sectores de calibración.

Al no contar con un periodo completo de datos en los observados, la evaluación se está realizando de acuerdo con la cantidad de datos disponible, obviando las fechas en las que no se dispone datos, esta evaluación se ha realizado en el siguiente orden. 1) Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (PISCO). 2) Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE). 3) The Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG, the final Run). 4) Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM, 3B42V7). 5) National Oceanic and Atmospheric Administration's Climate Prediction Center morphing technique" (CMORPH). 6) Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS). Para esta fase la estimación se ha realizado mediante métricas estadísticas de evaluación del sesgo como se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11: Métricas estadísticas y sus correspondientes ecuaciones para evaluación del sesgo de los productos de PPES.

Estadístico	Ecuación	Unid.	Min, Max, Óptimo
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	mm	0,1,0
Percent Bias (PBIAS)	$PBIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^N O_t}$	%	$-\infty, +\infty, 0$
Coefficiente de correlación lineal (CC)	$CC = \frac{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^N [(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y})]}{\left(\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^N (x_1 - \bar{x})^2} \right) \left(\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^N (y_1 - \bar{y})^2} \right)}$	-	-1,1,0

Nota: Donde S_i son los valores estimados por el satélite en el tiempo i y O_i son los valores de precipitación observados en el tiempo i ; σ_{xy} es la covarianza de los valores x, y ; σ_x es la desviación típica de la variable x ; σ_y es la desviación típica de la variable y ; \bar{x} y \bar{y} son los valores promedios de x e y . x_1 valores estimados de precipitación y y_1 valores de precipitación observados.

A. Evaluación a nivel de estación-píxel

En esta etapa se realizó la evaluación puntual del sesgo entre la información observada de las 16 estaciones (**Tabla 3**) con los valores extraídos para el píxel donde se ubica la estación, para cada uno de los PPES en evaluación.

Esta evaluación consiste en comparar las series extraídas en un píxel de cada PPES con los valores del punto donde se ubica una estación en tierra (valores observados) los cuales luego se calculará su sesgo mediante los estadísticos de RMSE, CC y PBIAS.

B. Evaluación a nivel de subcuencas

Esta siguiente etapa de la evaluación espacial meteorológica se evalúa la precipitación media caída en cada subcuenca referente a cada PPES, a partir de este punto los valores observados serán "**Estaciones (IDW)**".

En este trabajo se evaluó el sesgo de los PPES a nivel estaciona, tal sea DEF (diciembre-enero-febrero), MAM (marzo-abril-mayo), JJA (junio-julio-agosto) y SON (setiembre-octubre-noviembre) en cada subcuenca para así poder caracterizar el sesgo de los productos en los periodos secos y húmedos en la cuenca; posterior a ello se hizo el cálculo de las métricas de RMSE, CC y PBIAS.

C. Evaluación en sectores de calibración

Esta etapa final de la evaluación meteorológica se desarrolló en base a los sectores de calibración establecidos en la Figura 16. Esta evaluación se basó en las siguientes fases:

- a) Variedad en la representación climatológica de la precipitación.
- b) Variación estacional mediante el diagrama de Taylor

Este análisis como se ha mencionado en el apartado 2.3.1 Manejo de la información climática grillada, se hace para el mismo periodo de datos común (2000 – 2015).

2.3.3. Evaluación del modelamiento hidrológico

El objetivo de esta fase consistió en evaluar el desempeño del modelo hidrológico conceptual en un enfoque semidistribuido del modelo a paso diario GR4J, referente a los PPES con las observaciones que será la interpolación de “Estaciones (IDW)”. Para un mejor entendimiento esta fase ha subdividido la construcción en 2 etapas:

A. Configuración del modelo hidrológico

Para poder lograr que el modelo logre el enfoque semidistribuido se realizó la discretización de la topología de los caudales para poder realizar el enrutamiento manual de los caudales acumulados en cada subcuenca, en la Tabla 12 se detalla esta discretización, además de ello como ya se ha mencionado con anterioridad al tener caudales en la cuenca con un largo periodo de cobertura de datos en la parte alta, media y baja de la cuenca es que se establecieron los sectores de calibración.

B. Calibración, validación y verificación del modelo

Considerando que el periodo en evaluación para el modelamiento hidrológico es 2000 – 2015, la **Tabla 12** detalla los periodos seleccionados donde se ha considerado 1 año como periodo de calentamiento, para reducir la incertidumbre asociada a las condiciones iniciales del modelo.

Los periodos de datos más recientes se utilizaron para la calibración y los periodos más antiguos para validar; la verificación es una segunda validación, pero estos solo se ha realizado en aquellos productos que

dispones de datos de antes del año 2000, cual es el caso de RAIN4PE, PISCOpd y CHIRPS.

Tabla 12. Periodos seleccionados de calibración y validación del modelo.

Periodos	Fechas
Calentamiento (Warm up)	2006/01/01 – 2007/12/31
Calibración	2005/01/01 – 2010/12/31 *
	2007/01/01 – 2015/12/31
Validación	2000/01/01 – 2004/12/31 *
	2000/01/01 - 2004/12/31
Verificación	1981/01/01 – 2000/12/31
	1998/01/01 – 2000/12/31 **

Nota: (*) Años de calibración y validación considerados para el sector 1, debido a la poca disponibilidad de datos para ese periodo en la estación Pindo AJ Amarillo (PAA). (**) En el caso de CMORPH e IMERGDF, se ha considerado un periodo más corto de verificación, debido a la disponibilidad de datos.

a. Función objetivo y métricas de desempeño

La ecuación utilizada para el objetivo de calibración (GOF) mediante SCE-UA, se presentan en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Función Objetivo y métricas de desempeño para el modelo hidrológico GR4J.

Estadístico	Ecuación	Autor	Descripción
	KGE		Función
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	$= 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ $\alpha = \frac{\theta x}{\theta O}, \beta = \frac{ux}{\mu O}$	Gupta et al., 2009	Objetivo (GOF) Flujos altos Flujos medios
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_p)^2}$	Nash & Sutcliffe, 1970	Flujos en general
Nash-Sutcliffe Efficiency logarithm (NSElog)	$NSE_{log} = 1 - \sum_{i=1}^N$	Krause et al., 2005	Flujos bajos
Medium absolute error (MAE)	$MAE = 1/N \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \vee$	-	Sesgo

Donde: S_i son los datos simulados; O_i datos observados de caudales; O_p es el promedio de los datos observados, n es el número de observaciones.

2.3.4. Evaluación en un enfoque de firmas hidrológicas

En esta fase final de la metodología se realizó la evaluación de los resultados de las simulaciones de caudales medio diarios de cada modelo analizados y evaluados mediante firmas hidrológicas o índices de flujo que guardan relación entre caudal y precipitación (Tabla 13). Estas firmas fueron agrupadas según:

1. Distribución del flujo
2. Dinámicas del flujo
3. Proporción de escorrentía
4. Análisis del régimen de caudales

El objetivo de esta fase consistió en poder responder el segundo objetivo específico, evaluar cual era el/los mejor(es) producto(s) de precipitación estimada por satélite, dado que las firmas hidrológicas pueden cuantificar la función de la respuesta hidrológica de la cuenca en base a la precipitación, por tal motivo es que se está evaluando diferentes entradas de datos de precipitación para conocer su aplicabilidad en la cuenca. Esta evaluación consistió en:

A. Evaluación en los sectores de calibración

Para esta evaluación se consideró pertinente evaluarlo en las estaciones donde se contaba con un periodo extenso de datos observados de caudales, estas estaciones hidrométricas con tales requisitos se encuentran justamente en cada sector de calibración, particularmente en la estación Pindo AJ Amarillo (sector 1), Puyango en CPTO. Militar (sector 2) y finalmente El Tigre (sector 3). Un conjunto de firmas que describen el comportamiento lluvia – escorrentía son detallados en la Tabla 13. Para el cálculo de estas firmas se hizo uso del software R

utilizando el repositorio de libre acceso utilizado en (Addor et al., 2017), quienes usaron el código para calcular los atributos meteorológicos de 671 cuencas de los Estados Unidos.

Tabla 14. Firmas hidrológicas evaluadas en la cuenca Puyango - Tumbes

Firmas Hidrológicas	Nombre	Descripción	Unidad	
<i>Distribución del flujo</i>	Qm	Caudal medio	Caudales medios para el periodo de análisis.	mm/día
	Q0.01, Q0.05, Q0.10, Q0.25, Q0.50, Q0.75, Q0.90, Q0.99	Percentiles del caudal	Percentiles de exceso de flujo altos y bajos Curva de Duración del flujo.	mm/día
	BFI	Índice de flujos bajos	Contribución del caudal base al caudal total, calculado a partir de los flujos diarios usando el método de Ladson et al., 2013.	
<i>Dinámicas de flujo</i>	S_FDC	Pendiente de la curva de duración del flujo (caudales)	Pendiente de la curva de duración del flujo (entre 33 y 66% de los valores de excedencia del caudal); Eq. (3) in Sawicz et al. (2011).	-
	Stream_elas	Elasticidad del flujo	Elasticidad de la precipitación con el caudal (sensibilidad de caudal a los cambios en la precipitación en la tasa anual temporal, tomando como referencia el caudal medio diario); Eq. (7) in sankarasubramanian et al. (2001).	-
<i>Proporción de escorrentía</i>	RR	Proporción de escorrentía total (Runoff – Ratio)	Proporción de escorrentía (relación entre la descarga diaria media y la precipitación diaria media).	-
<i>Régimen del caudal</i>	Q	Curva Q	Media diaria interanual acumulada, curva Q	mm
	P	Curva P	Media diaria interanual acumulada, curva P	mm
	P-Q	Diferencia P-Q	Media diaria interanual acumulada, diferencia P-Q	mm

Nota: Adaptado de (Westerberg & Mcmillan, 2015); Los cálculos de las firmas se realizó para el periodo de 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre del 2015.

B. Variabilidad de las firmas hidrológicas de los mejores PPES en cada subcuenca

Para poder seleccionar que PPES es/son el/los mejores según la evaluación mediante firmas hidrológicas, se realizó un análisis visual y estadístico de los resultados simulados con los observados por los caudales en los sectores de calibración, el Coeficiente de Correlación de Pearson (CC) fue considerado para el análisis estadístico en base a una correlación cruzada, donde se estableció como un umbral de selección de los mejores productos aquellos > 0.97 del CC.

Una vez realizado este análisis y haber seleccionado aquellos productos que logran cumplir con los requisitos del umbral, se procedió a calcular las firmas hidrológicas para cada subcuenca tomando como base los valores medios resultantes de estos valores de los productos seleccionados, y extrapolando sus valores, esto con el fin de poder caracterizar espacialmente la variabilidad de la respuesta hidrológica de cada una de las 24 subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes; como un agregado también se calculó la distribución lineal de las firmas que es un gráfico de la línea de tendencia de variabilidad espacial de cada firma hidrológica.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En el presente capítulo se resumen en varias etapas los resultados según los índices propuestos en la metodología, las interpretaciones de los resultados de los indicadores estadísticos se realizarán mediante tablas y gráficos.

3.2. Resultados

3.2.1. Evaluación meteorológica

Esta evaluación se realizó en tres etapas las cuales se muestran a continuación:

A. Evaluación a nivel de estación - píxel

Se ha obtenido en relación con el CC, que los productos RAIN4PE Y PISCOpd tienen mejor correlación con los datos observados en campo, con un promedio entre el total de estaciones de 0.61 y 0.4 respectivamente (Figura 15). En el caso del PBIAS los productos que menor sesgo tienen son RAIN4PE y CHIRPS con valores de -0.62 y -14.18, los cuales indican subestimación debido al signo negativo por parte de los PPES (Figura 16). Por último, para el RMSE, los productos con menor error son RAIN4PE e IMERGDF, con valores de 7.54 mm y 9.49 mm, respectivamente (Figura 17).

Los paneles se muestran los resultados de cada PPES y están distribuidos según el orden de evaluación mencionado en la metodología. Los círculos en la imagen representan una estación, la coloración y el tamaño de estos están en función a la correlación del producto con los valores de la estación con el extraído en cada PPES; valores más rosas indican una baja correlación mientras que valores morados indican una alta correlación > 0.8 .

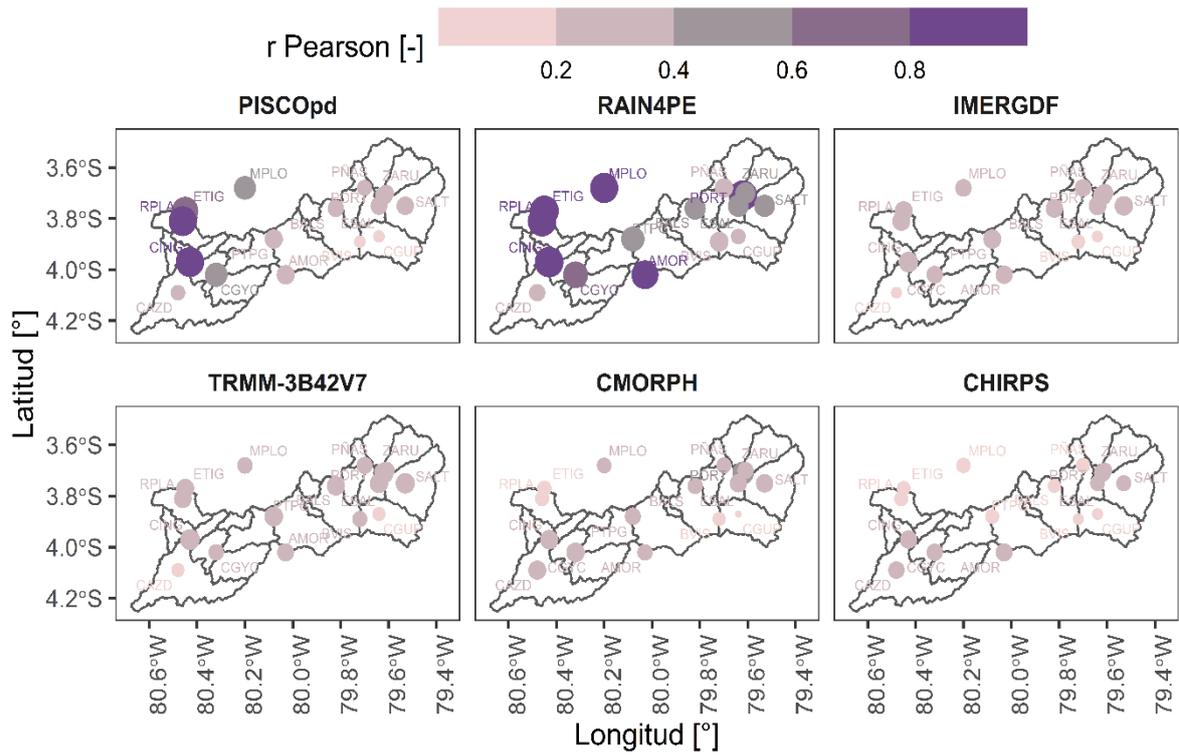


Figura 15. Distribución espacial del Coeficiente de Correlación de Pearson (CC) entre los datos de Estaciones in situ y los PPES.

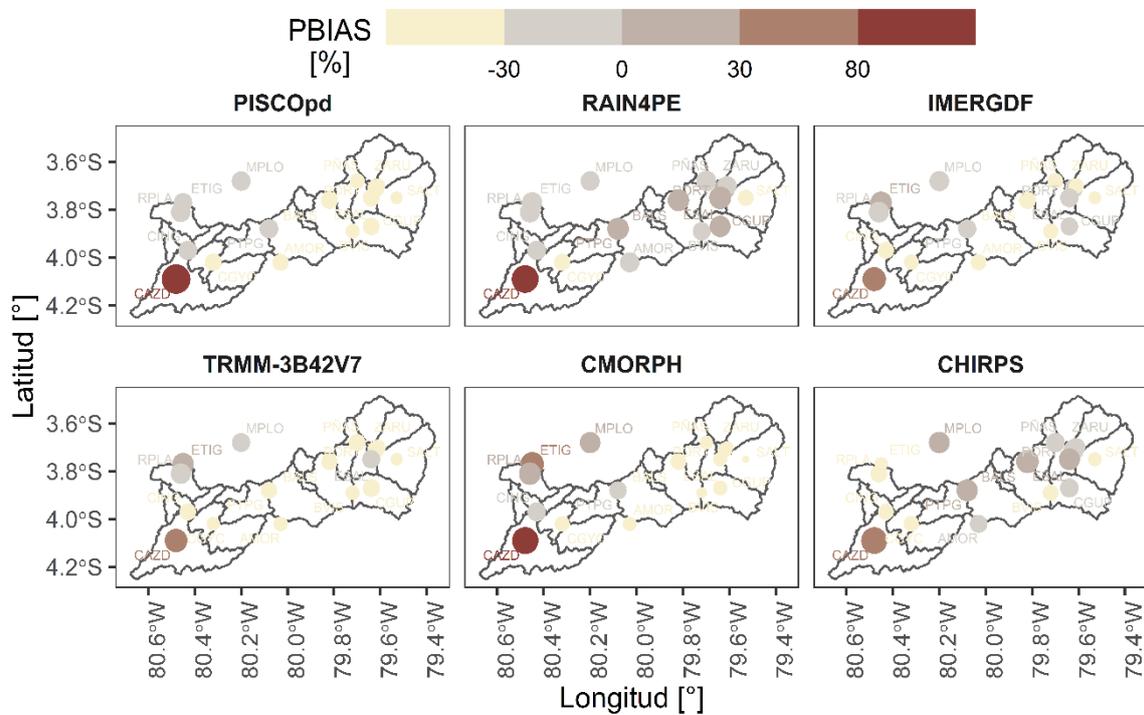


Figura 16. Distribución espacial del índice de PBIAS, estación – píxel.

Los círculos en la imagen representan una estación, la coloración y el tamaño de estos están en función al porcentaje de sesgo (PBIAS %) del producto con los valores de la estación con el extraído en cada PPES; valores más amarillos indican una alta subestimación de los PPES en cuanto a los observados y por lo tanto se traduce en un desempeño *inadecuado*, mientras que los valores más rojos oscuros indican una alta sobrestimación de los valores, lo que se traduce también en un desempeño *inadecuado*; los valores menores a 30% y cercanos a 0 se traduce en desempeños *adecuados* y *buenos* de los PEES. La mayoría de los productos evaluados concuerdan en que la estación Cazaderos existe bastante sobrestimación en cuanto a los observados.

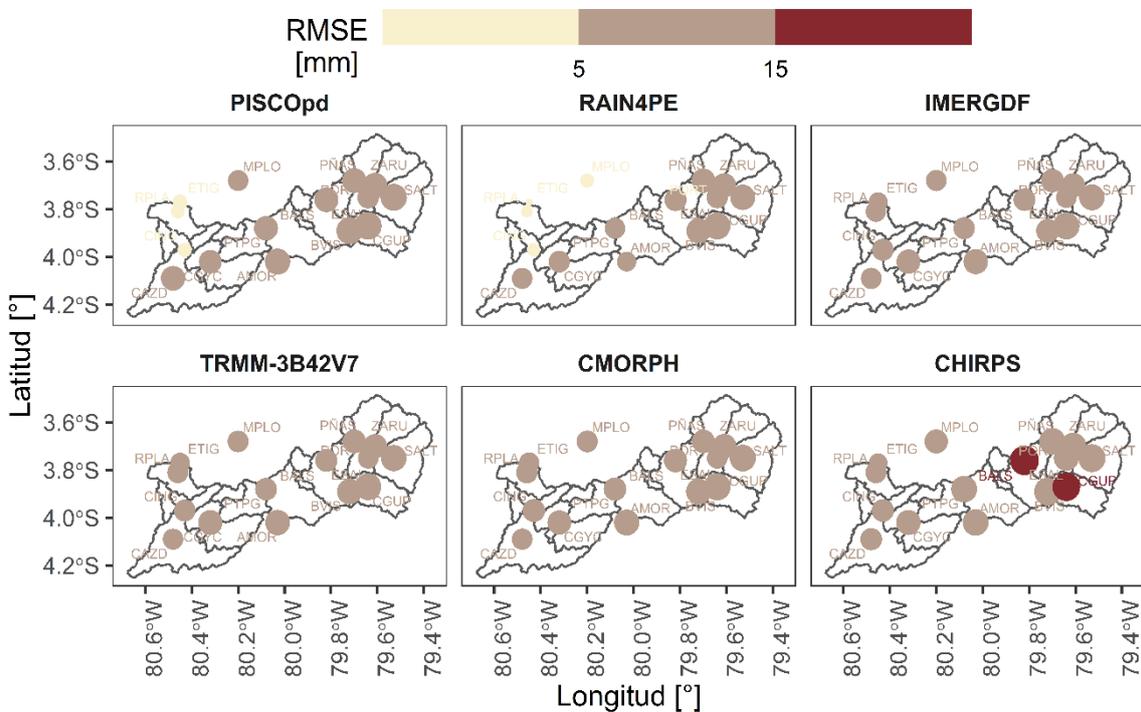


Figura 17. Distribución espacial del índice de RMSE, estación – píxel.

Para el RMSE los valores más amarillos (0 – 5 mm) indican un sesgo bajo de los PPES en cuanto a los observados y por lo tanto se traduce en un desempeño *muy bueno*, mientras que los valores más rojos oscuros (>15 mm) indican alto sesgo de los valores de los productos, lo que se traduce en un desempeño *aceptable*. La mayoría de los productos evaluados demuestran que el sesgo de los modelos oscila en el rango de 5 – 15 mm, y esto se traduce en un desempeño *bueno*.

B. Evaluación en subcuencas

La **Tabla 15** resume los valores promedio para estadístico CC, PBIAS y RMSE a nivel de subcuencas. Los valores individuales de cada subcuenca se presentan del **Anexo 11** al **Anexo 16**, donde se detalla cada resultado por subcuenca. El **Anexo 18** detalla la topología usada para la calibración del modelo hidrológico.

Tabla 15. Valores promedios de los índices estadísticos evaluados en cada subcuenca

	MÉTRICAS	PISCO	RAIN4PE	IMERGD F	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRP S
DEF	CC (-)	0.40	0.57	0.31	0.30	0.29	0.17
	PBIAS (%)	-37.53	-14.07	-48.45	-49.29	-52.83	-29.85
	RMSE (mm)	12.43	9.23	11.14	11.28	11.31	15.00
MAM	CC (-)	0.47	0.66	0.37	0.36	0.27	0.26
	PBIAS (%)	-24.90	-3.94	-36.91	-37.98	-38.51	-14.03
	RMSE (mm)	11.88	8.39	10.60	10.79	12.14	14.28
JJA	CC (-)	0.45	0.52	0.14	0.10	0.08	0.11
	PBIAS (%)	-74.31	-24.83	43.24	8.74	-9.80	-58.77
	RMSE (mm)	1.14	1.15	1.96	2.06	1.47	1.43
SON	CC (-)	0.44	0.52	0.25	0.24	0.12	0.04
	PBIAS (%)	-30.16	-17.45	47.45	30.92	37.20	-49.82
	RMSE (mm)	1.91	2.00	2.45	2.61	2.57	2.21

La **Figura 18** muestra la distribución lineal de los índices evaluados, considerando valores trimestrales (estaciones del año). Para la estación de Verano (DEF) se tiene que las subcuencas con mayor elevación presentan menor correlación al observado, mientras que a menor elevación mayor correlación (CC) con la precipitación observada para la época de enero-diciembre-febrero. En términos de Sesgo porcentual (PBIAS %), sucede lo contrario a mayor elevación, se presenta menor sesgo, en el caso de PISCO, CHIRPS y RAIN4PE este sesgo es casi estacional (valores entre 0 a -20%), tanto para subcuencas de mayor elevación a menor elevación, los demás productos presentan tendencia a mejorar cuando la elevación es menor. En cuanto al RMSE las subcuencas de mayor elevación

presentan mayor error en (mm), siendo RAIN4PE y PISCO los productos con menor error posible, cuando la elevación es menor, presentando valores menores a 5 mm.

Continuando con la época húmeda de la cuenca (MAM), se observan altas diferencias entre RAIN4PE con respecto a los demás productos (en términos de CC), presentando valores mayores a 0.50, los demás productos presentan tendencia estacional. Para el PBIAS en esta época el sesgo es menor, CHIRPS presenta similitud a los valores mostrados por RAIN4PE en subcuencas de elevación mayor (-25 a 0%). Los valores observados y de cada PPES para el RMSE presenta valores menores a 15mm, siendo el mejor producto RAIN4PE.

En la época de junio-julio-agosto (JJA), una época de estiaje para la cuenca, PISCO y RAIN4PE presentan por lejos los mayores valores de CC (≥ 0.50), mientras que los demás productos presentan la misma tendencia entre ellos. Para el caso del sesgo porcentual, PISCO, CHIRPS y RAIN4PE tienen los mejores valores de PBIAS (-20% a 20%); finalmente para existen PPES que presentan menor error (RMSE) en cuanto al observado (≤ 3 mm).

Culminado con la época de setiembre-octubre-noviembre (SON), los valores de CC son relativamente bajos en las subcuencas de elevaciones altas, sin embargo, PISCO y RAIN4PE mejora cuando las elevaciones son mejores (≥ 0.68). El PBIAS (%) en esta época es muy similar entre los productos (-20% a 20%), a excepción de CMORPH que sus valores aumentan considerablemente en subcuencas de menor elevación. Culminando con el RMSE todos los productos presenta la misma estacionalidad, variando entre 4 – 0 mm.

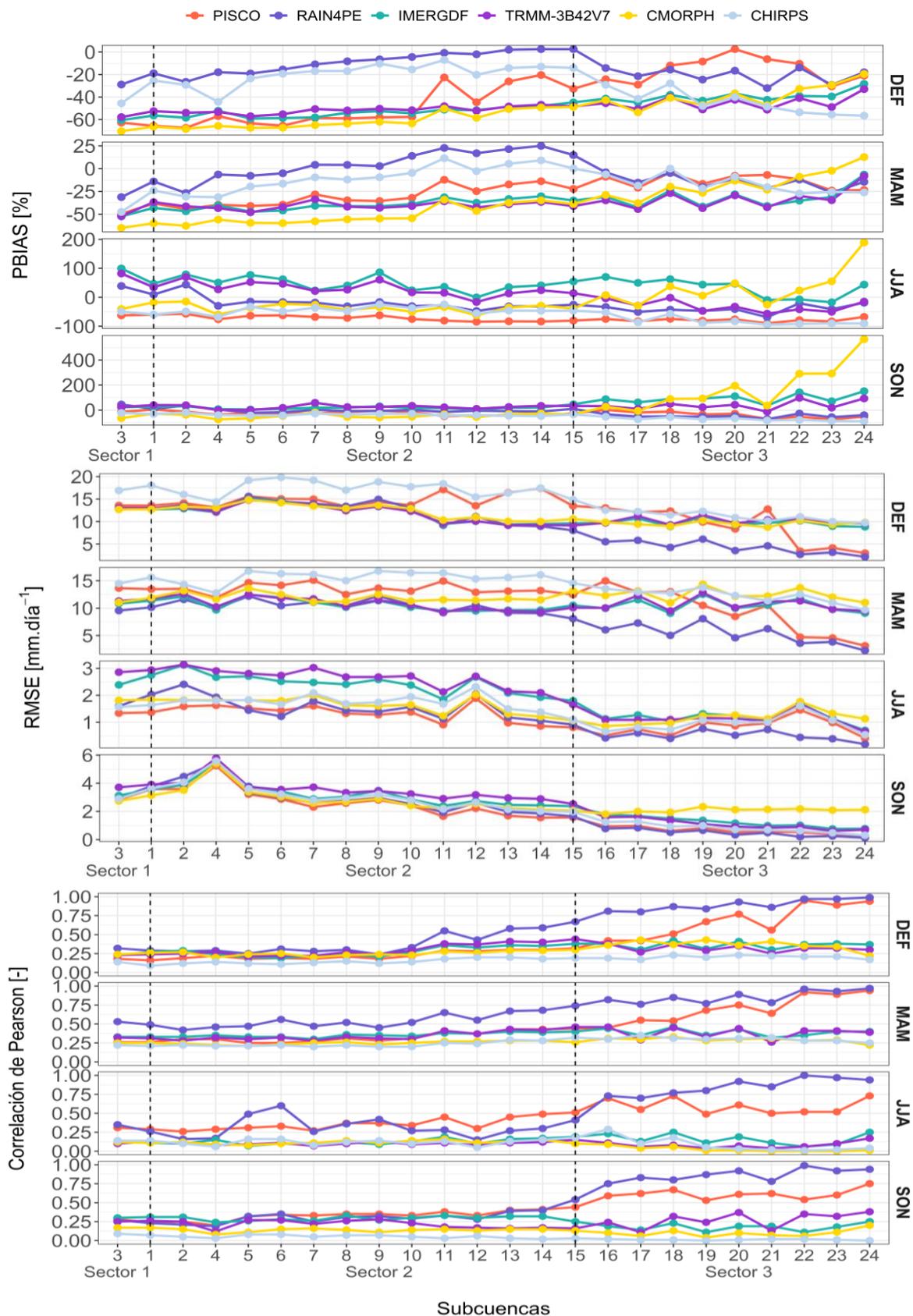


Figura 18. Distribución lineal de los índices de evaluación del sesgo (CC, PBIAS, RMSE) en cada subcuenca ordenada de mayor a menor elevación.

C. Evaluación en sectores de calibración

En esta subetapa se realizó un último análisis de la precipitación media diaria en cada sector de calibración, como se observa en la **Figura 19** donde se representa el comportamiento estacional de la precipitación observada y la estimada por satélite. De esta evaluación se puede inferir que todos los productos representan correctamente la estacionalidad de los periodos secos (periodos de estiaje) de Diciembre a abril y para los periodos húmedos (periodos de avenidas) de Mayo a noviembre para los 3 sectores evaluados, sin embargo, solo el producto RAIN4PE es el más semejante a reproducir las intensidades observadas para los sectores 2 y 3 con menores rangos del sesgo porcentual (PBIAS %), contrariamente a los demás productos. Para el sector 1 ningún producto es capaz de reproducir las magnitudes observadas correctamente.

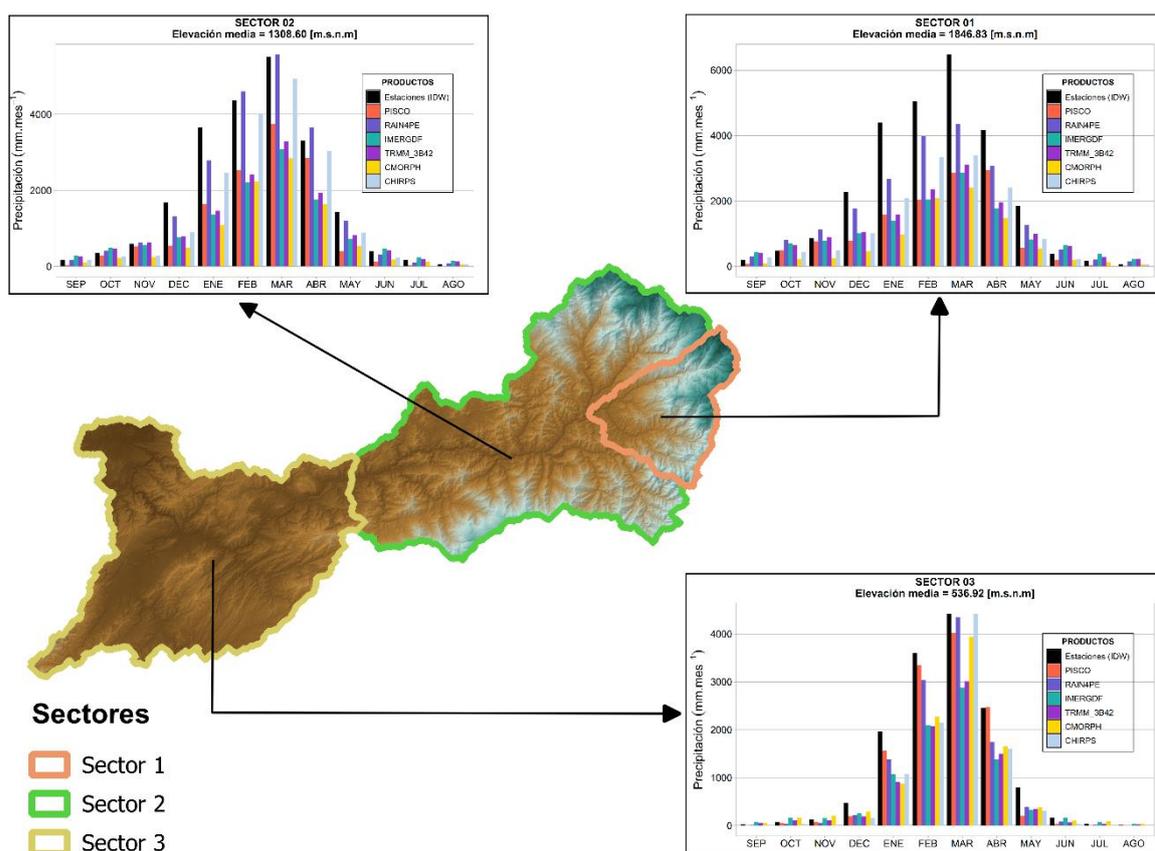


Figura 19. Estacionalidad de la precipitación de los PPES referente a las observaciones en cada sector.

De la evaluación estacional, inferimos que el sector 1 es el que mayor sesgo representa con respecto a los valores observados. Si analizamos detalladamente los resultados para el sector 1 con el Diagrama de Taylor, quien es capaz de resumir los resultados respecto a la precipitación observada, se tiene que para el Coeficiente de Correlación de Pearson (CC) los valores para el producto PISCO varían entre 0.19 – 0.26, para RAIN4PE desde 0.16 – 0.27, IMERGDF desde 0.1 – 0.32, siendo este valor de correlación el más alto de todos los productos dado en la época de Primavera (SON), TRMM-3B42V7 varía entre 0.1 – 0.26, CMORPH entre 0.12 – 0.27 y finalmente CHIRPS que sus valores van desde 0.05 – 0.12, siendo el producto que peor correlación tiene para ese sector.

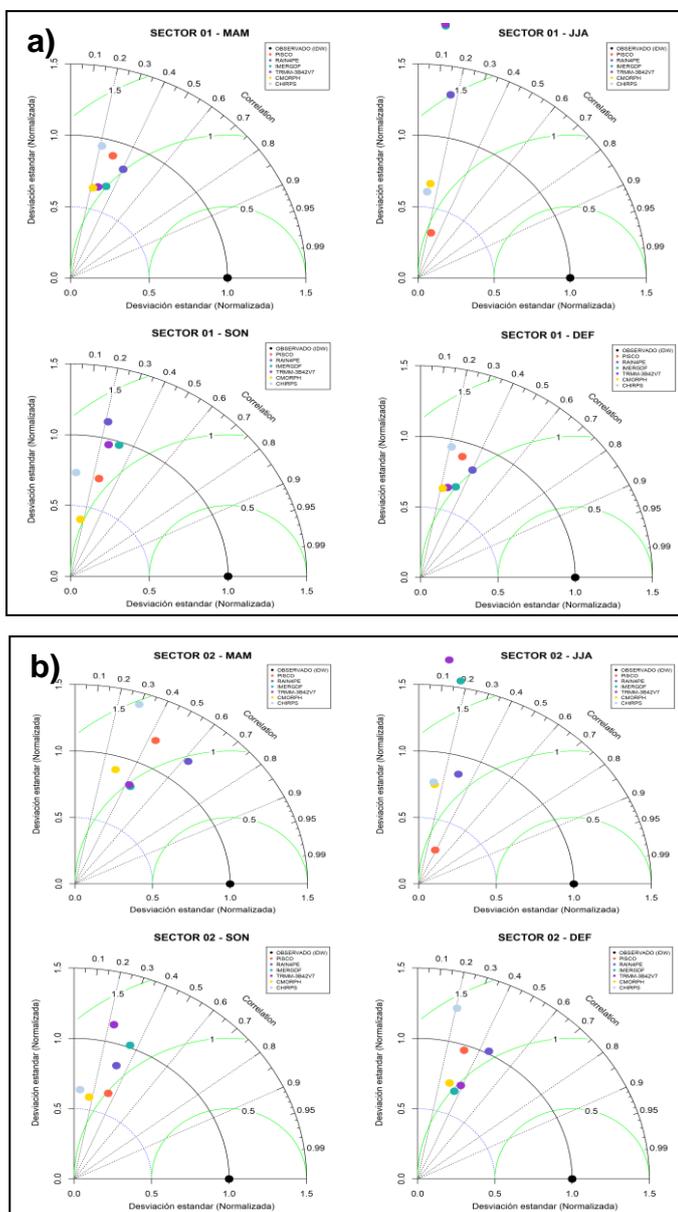
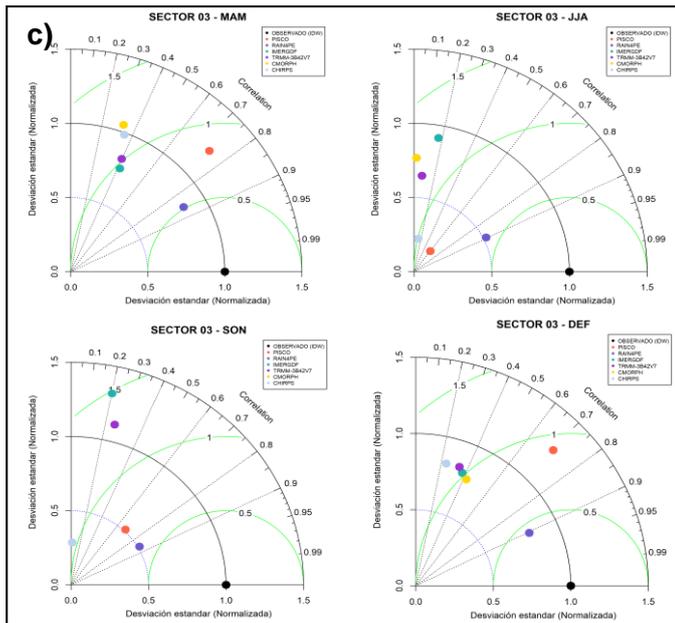


Figura 20. Diagramas de Taylor para la evaluación estadística por épocas del año en los sectores de calibración.

Nota: a) Sector 1, b) Sector 2 y c) Sector 3. Punto de color negro refiere a los datos de precipitación observada, Punto de color rojo claro refiere al producto PISCO, punto de color azul corresponde al producto RAIN4PE, punto de color amarillo refiere a CMORPH, punto de color celeste al producto CHIRPS, punto de color verde al producto IMERGDF y finalmente el punto de color morado refiere al producto TRMM-3B42V7.



Si bien es cierto el Diagrama de Taylor resume 3 índices estadísticos (CC, SD y RMSE) no toma en cuenta el factor de la intensidad de precipitación, por lo que para el sector 1 se tiene que para los periodos comprendidos entre Diciembre y Mayo existe una subestimación de la precipitación con $PBIAS = -51.18 \%$ en promedio para todos los productos evaluados, mientras que para los periodos entre Julio y Noviembre existe una ligera sobrestimación con un $PBIAS = 6.63\%$ en promedio para todos los productos. Si este análisis se hace de manera individual para el periodo Julio y noviembre, se tiene que el producto TRMM-3B42V7 sobrestima la precipitación en un 52.6% y el IMERGDF en un 64% , CHIRPS y CMORPH subestiman los valores observados con un $PBIAS = -51.55\%$ y $PBIAS = -35\%$ respectivamente, mientras que PISCO subestima con un $PBIAS = -37.35 \%$ y RAIN4PE sobrestima en un 43.95% . De manera general para este sector se puede decir que, a pesar de la incertidumbre existente en la intensidad de precipitación observada con los PPES, el producto RAIN4PE tiene mejores índices estadísticos que los demás productos, lo que cual también se ve reflejado en el Diagrama de Taylor y en la simulación hidrológica.

3.2.2. Evaluación hidrológica

A. Calibración, validación y verificación de las simulaciones

Como se ha mencionado la calibración del modelo se ha dividido en 3 sectores (**Figura 11**). Para el Sector 1 se observan resultados medianamente satisfactorios ya que al igual que en la evaluación meteorológica, este sector es el más crítico, los caudales observados de la estación Pindo AJ Amarillo cuenta con tendencias y valores inciertos para los periodos establecidos para calibración y validación (**Tabla 12**).

Los valores de calibración y validación son mostrados en los hidrogramas generados para cada una de las 6 fuentes de precipitación estimada y los generados por la precipitación observada en el sector 1 (**Figura 21**).

La **Figura 25** muestra un resumen de los valores para las métricas de desempeño de todos los sectores. Para la etapa de **calibración**, el modelo que mejor representa los caudales medios diarios generales y menor sesgo porcentual obtuvo es CHIRPS ($KGE = 0.54$, $PBIAS = 1\%$), el mejor valor del coeficiente de Nash Sutcliffe (NSE) fue para el modelo TRMM-3B42V7 ($NSE = 0.31$), seguido de IMERGDF ($NSE = 0.25$), el producto que mejor ha representado los caudales bajos fue RAIN4PE ($\log NSE = 0.32$), para los métricas de error el producto TRMM-3B42V7 representa el menor RMSE ($24.06 \text{ m}^3/\text{seg}$) y RAINAPE representa el menor error medio absoluto ($MAE = 13.91 \text{ m}^3/\text{seg}$), sin embargo ambos productos representa de igual forma la correlación entre los caudales observados ($CC = 0.56$).

Para la etapa de **validación** sin duda el producto RAIN4PE ha obtenido las mejores métricas ($KGE = 0.68$, $NSE = 0.39$, $\log NSE = 0.68$, $MAE = 8.48 \text{ m}^3/\text{s}$, $RMSE = 14.33 \text{ m}^3/\text{s}$, $CC = 0.74$), sin embargo, el que mejor sesgo porcentual obtuvo fue la interpolación de la precipitación observada (Estaciones IDW), $PBIAS = -10\%$; Para visualizar estos resultados detallados en tabla ver el **Anexo 22**.

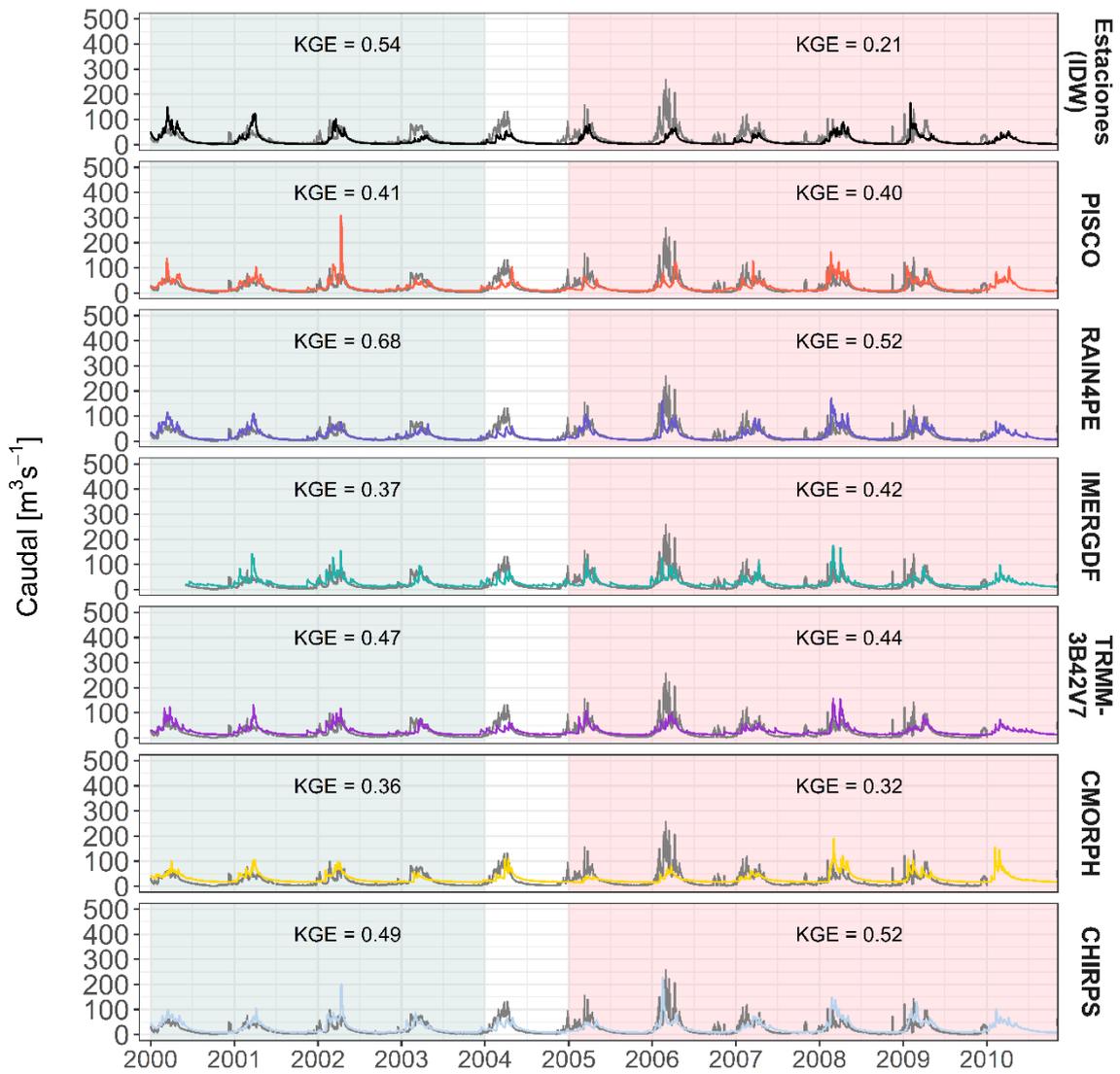


Figura 21: Caudales simulados para el Sector 1, periodo 2000 - 2010.

Los paneles de cada producto están en función a la descripción en la metodología de acuerdo con el orden de evaluación. Los resultados de KGE se representan en valores de 0 a 1, donde el más cercano a 1 es el que mejor desempeño obtuvo. El rectángulo de color Turquesa es la etapa de validación y el rectángulo de color rojo para la calibración, color blanco es el periodo de calentamiento. En este sector se considera oportuno evaluar solo del año 2000 al 2010 debido a que los valores observados más adelante del 2010 presentaban muchos vacíos.

Continuando con el Sector 2 hasta la estación Puyango en CPTO. Militar, para la etapa de **calibración** se tiene valores altos de KGE entre 0.71 – 0.87, a excepción de TRMM-3B42V7 que presenta un valor de KGE 0.61 (**Figura 22**), la interpolación de las estaciones (Estaciones IDW) en este sector tiene el valor más alto de KGE = 0.87, los caudales altos fueron mejor representados por RAIN4PE (NSE = 0.77), para los caudales bajos hubieron valores altos ($\log\text{NSE} = 0.9$ y $\log\text{NSE} = 0.84$) siendo el primer valor para Estaciones (IDW), y el segundo valor igualado entre RAIN4PE y CHIRPS, 3 productos tuvieron los menores errores con respecto al hidrograma observado (Estaciones IDW, RAIN4PE y CHIRPS) teniendo valores de RMSE (50.95, 47.55, 57.04) m³/s ; MAE (20.4, 24.22, 27.63) m³/s y PBIAS (2.9%, -3.2%, 3.8%) y una alta correlación (CC = 0.87, 0.88, 0.84) en el orden antes mencionado de los productos.

Para la etapa de **validación** se observa que solo las Estaciones (IDW) y RAIN4PE son los productos con más altos índices evaluados con valores de KGE entre 0.90 – 0.94, $\log\text{NSE}$ entre 0.85 – 0.86, NSE = 0.85, MAE entre 15.97 – 17.96, RMSE entre 35.45 – 35.52 m³/s de error y un CC entre 0.92 – 0.94, solo RAIN4PE es el que menor PBIAS tiene sobrestimando en 1.9% los caudales en esta etapa.

Cabe mencionar que los productos de PISCO y RAIN4PE son productos que han sido corregidos con información de estaciones, sin embargo, PISCO solo ha sido corregido para la zona peruana, pero a pesar de eso, tiene un buen desempeño en este sector, por otro lado, RAIN4PE si ha sido corregido con estaciones de Ecuador, por ello se evidencia el buen desempeño en las simulaciones para el sector 1 y 2. Para los productos que no han sido corregidos con estaciones el que más destaca sin duda es el producto CHIRPS con un KGE promedio igual a 0.80, los demás productos están por debajo de CHIRPS en un 20% con valores KGE promedio entre 0.61 – 0.69.

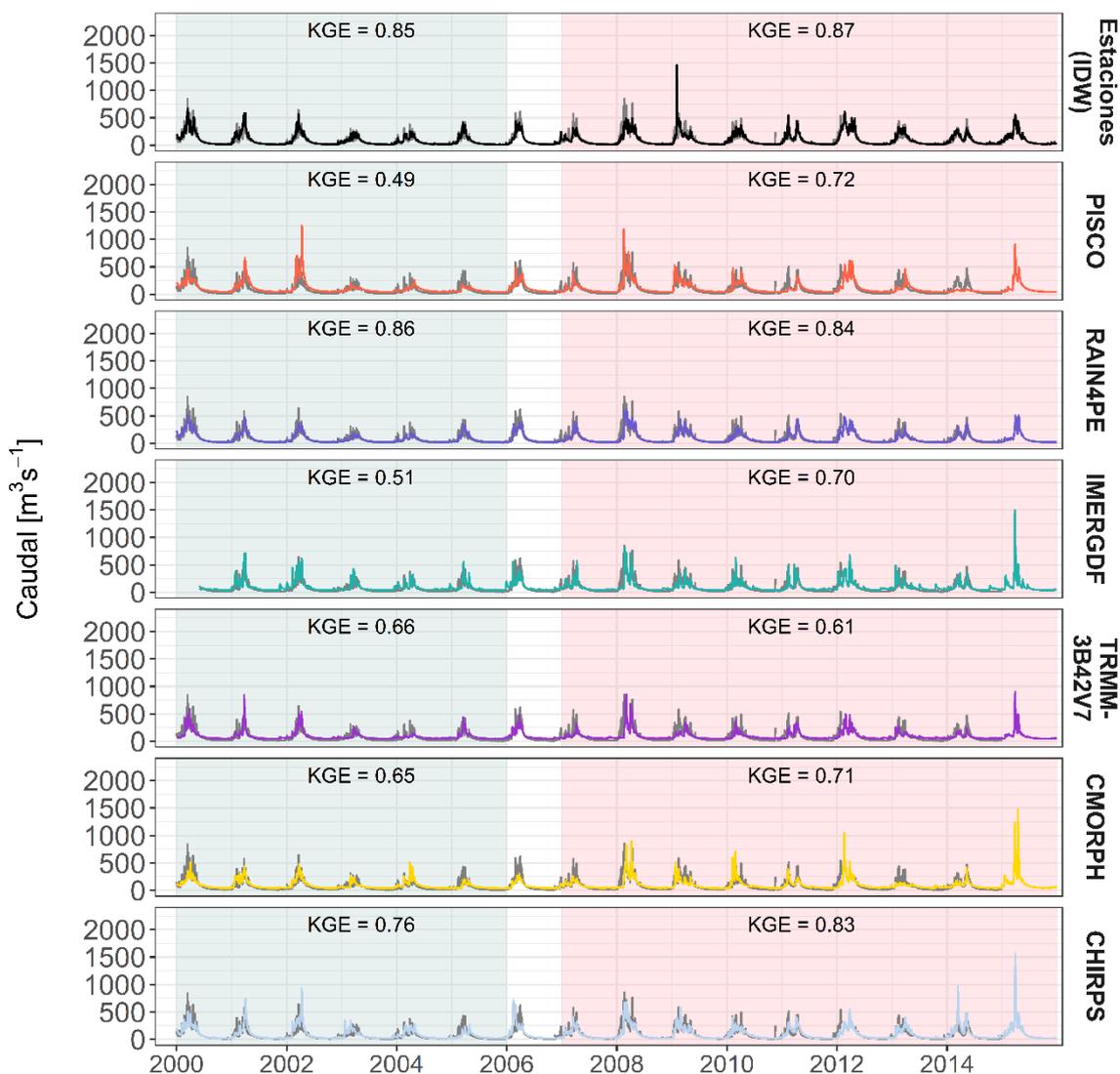


Figura 22: Caudales simulados para el Sector 2, periodo 2000 - 2015.

Los paneles de cada producto están en función a la descripción en la metodología de acuerdo con el orden de evaluación. El rectángulo de color Turquesa es la etapa de validación y el rectángulo de color rojo para la calibración, color blanco es el periodo de calentamiento. En este sector si se consideró un periodo más extenso para la calibración debido a la mayor disponibilidad de datos de caudales por parte de la estación Puyango en CPTO Militar.

Finalmente, para los resultados de las simulaciones hasta el punto de aforo en la estación El Tigre (Sector 3) la **Figura 23** muestra claramente que los hidrogramas están siendo mejor reproducidos por el producto RAIN4PE y la interpolación generada a partir de las observaciones (Estaciones (IDW)), teniendo valores de $KGE = 0.91$ y $KGE = 0.94$ respectivamente para la etapa de calibración y para la etapa de validación se presenta un $KGE = 0.86$ para RAIN4PE y $KGE = 0.87$ para Estaciones (IDW), en los índices evaluados ambos productos siguen siendo los que mejor desempeño han tenido ($\log NSE = 0.89 - 0.91$; $NSE = 0.87 - 0.89$; $MAE = 28.14 - 30.64 \text{ m}^3/\text{s}$; $RMSE = 69.19 - 70.95 \text{ m}^3/\text{s}$; $CC = 0.90$; $PBIAS = 2.65\% - 5.3\%$) en sus rangos de valores promedio entre las etapas de calibración y validación; Para este Sector la mejor representación generalmente ha sido la dada por la precipitación observada sobrestimando en un 2.65% los caudales observados para todo el periodo (2000 – 2015).

Sin embargo, si evaluamos los productos que no han sido corregidos con estaciones se tiene que el producto que más destaca en cuanto a reproducir los caudales bajos es CHIRPS con un $\log NSE = 0.77$, TRMM-3B42V7 y CMORPH son los que mejor reproducen por poco en comparación a los demás productos los caudales generales ($KGE = 0.67$, $KGE = 0.66$) y caudales altos ($NSE = 0.52$) respectivamente; Evaluando los índices de error CMORPH y CHIRPS son los productos que menor error representan en cuanto a lo observado ($MAE = 51.19 - 47.26$; $RMSE = 106.08 - 115.88 \text{ m}^3/\text{s}$; $PBIAS = 10\% - 12.85\%$) respectivamente para ambos productos. El mejor coeficiente de correlación de Pearson lo obtuvo CMORPH ($CC = 0.76$). De estos resultados podemos deducir que aquellos productos que estiman la precipitación que no han sido corregidos con estaciones evaluando las métricas, CHIRPS y CMORPH son los que mejor desempeño han tenido para este sector de manera general, si no se considera a los productos corregidos con estaciones in situ (PISCO y RAIN4PE).

En la **Figura 24** se muestra la curva de duración de los caudales para los 3 sectores mostrado precisamente que la mejor representación de la curva de duración observada son RAIN4PE, PISCO y CHIRPS, sin embargo, a mayores persistencias existe mayor incertidumbre en la respuesta en todos los PPES evaluados.

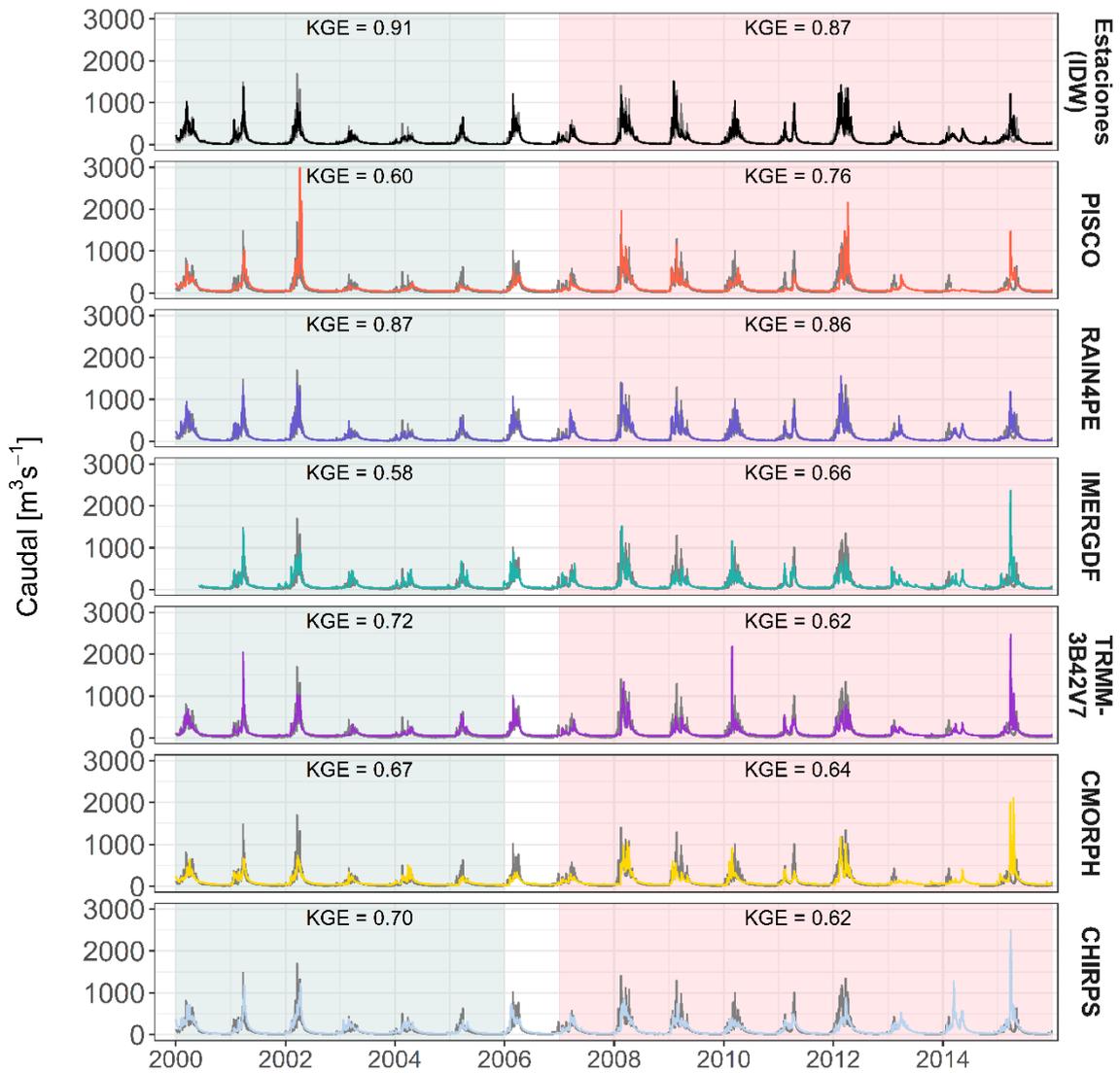


Figura 23: Caudales simulados para el Sector 3, periodo 2000 - 2015.

Los paneles de cada producto están en función a la descripción en la metodología de acuerdo con el orden de evaluación. El rectángulo de color Turquesa es el periodo de validación y el rectángulo de color rojo para la calibración, color blanco es el periodo de calentamiento.

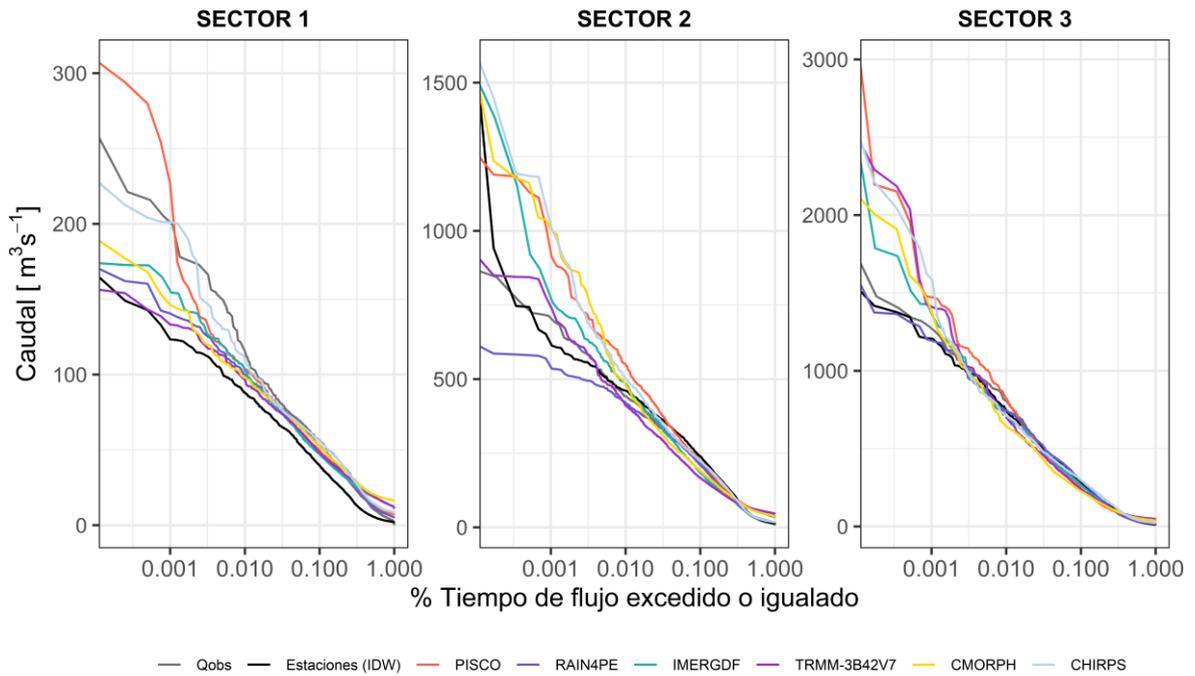


Figura 24: Curva de duración de caudales de los PPES, escala logarítmica en el eje x (periodo 2000 - 2015).

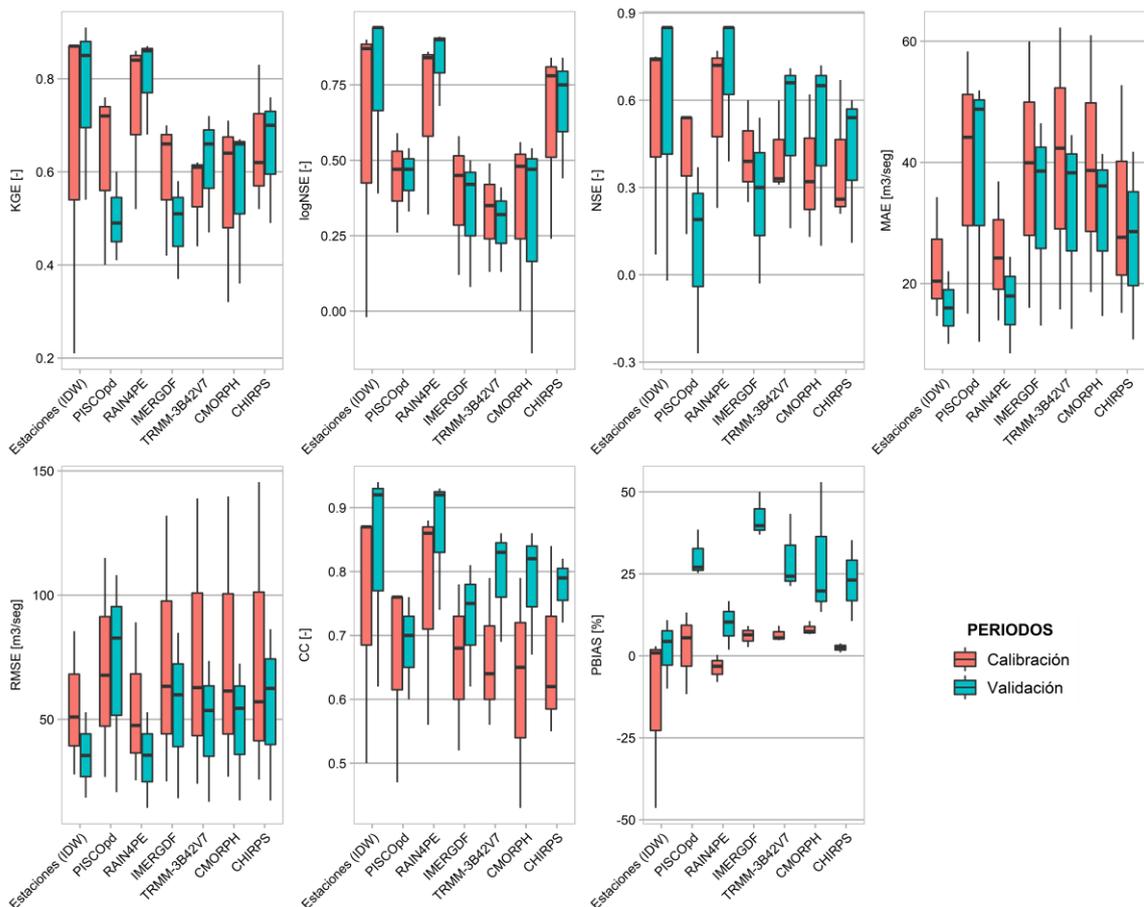


Figura 25: Métricas de desempeño del modelo GR4J para los diferentes PPES.

Para poder validar las simulaciones generadas por todos los PPES se hizo uso de los parámetros resultantes del modelo GR4J por sectores (**Figura 26**), considerando solo aquellos PPES que tienen datos simulados desde 1 de enero de 1981 hasta 31 de diciembre del 1999 (Estaciones (IDW), PISCO, RAIN4PE y CHIRPS), lo mismo sucede para las estaciones hidrológicas ya que no todas tienen un periodo extenso que funcione para validar los caudales simulados, por ello las estaciones con las que se validará son las mismas con las que se calibró el modelo, añadiendo dos estaciones más que son Amarrillo en Portovelo (AEP) y Puyango AJ Marcabeli (PAM), la **Figura 27** muestra las estaciones y productos evaluados para esta etapa.

Empezando por la estación Pindo AJ Amarrillo (PAA) perteneciente al sector 3, se visualiza que para los años 1981 – 1989 Estaciones (IDW) y RAIN4PE reproducen mejor el comportamiento de los caudales observados, pero para el periodo 1990 - 1999 solo CHIRPS logra reproducir medianamente la magnitud de los observados. Llevando estas observaciones a valores estadísticos de desempeño evaluados en la calibración y validación, se tiene que efectivamente CHIRPS en toda la serie evaluada tiene un mejor KGE = 0.56, pero RAIN4PE es el que mejor reproduce caudales bajos y altos ($\log\text{NSE} = 0.50$, $\text{NSE} = 0.36$), en cuanto al sesgo porcentual (PBIAS), CHIRPS sobrestima los caudales observados (PBIAS = 0.20%), PISCO subestima las observaciones (PBIAS = -3.70%), RAIN4PE subestima por mucho los caudales observados (PBIAS = -26.6%), lo mismo para las interpolaciones de la Estaciones (IDW) (PBIAS = -47.10%), de tal manera según la verificación en esta estación el mejor producto es CHIRPS.

Continuando con las estaciones pertenecientes al sector 2, la estación Puyango AJ Marcabeli (PAM) muestra valores inciertos en los primeros 9 años, el único producto que no representa correctamente el comportamiento del hidrograma observado es PISCO con un KGE = 0.31, y un NSE = -0.63, de igual manera el sesgo existe es mucho comparado con los demás productos, quienes tienen un PBIAS = -18.60% a -0.7%. y un KGE > 0.65 y un NSE >0.55.

En la estación Amarillo en Portovelo (AEP) ningún producto es capaz de reproducir el comportamiento y magnitud de los caudales observados a excepción de las interpolaciones Estaciones (IDW) quien presenta valores positivos en KGE, NSE y logNSE.

La última estación perteneciente al sector 2 es la estación Puyango en CPTO. Militar (PCM), Estaciones (IDW) y RAIN4PE reproducen correctamente los caudales altos con un NSE = 0.71 y NSE = 0.73 respectivamente, en cuanto a caudales general todos los productos presentan un KGE > 0.56, excepto PISCO que presenta un valor de KGE = 0.20, en cuanto al sesgo porcentual (PBIAS), CHIRPS y Estaciones (IDW) presentan los valores con menor sesgo (PBIAS = 0.9% y PBIAS = -5%) en el orden mencionado.

Finalmente, en la única estación perteneciente al sector 3, El Tigre (ETI) todos los productos presentan buen desempeño en los hidrogramas simulados representando correctamente el comportamiento de los caudales observados, sin embargo, Estaciones (IDW) y RAIN4PE son los que presentan altos valores en los índices estadísticos evaluados (KGE > 0.50, NSE > 0.60, logNSE > 0.84), CHIRPS y PISCO presentan menor sesgo (PBIAS = -12.5% y PBIAS = 6%).

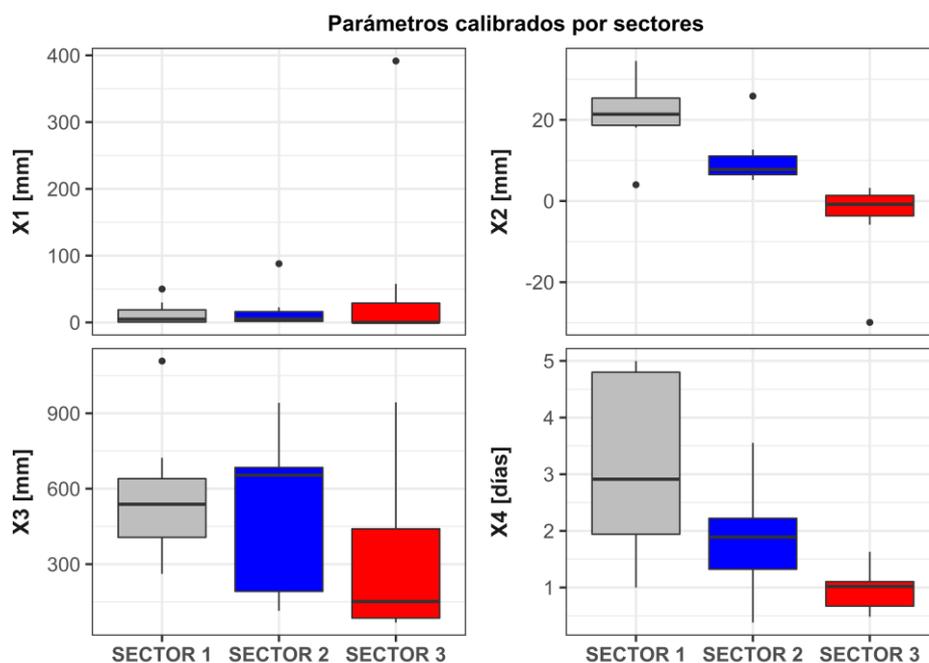


Figura 26: Diagrama de cajas del comportamiento de los parámetros por sectores.

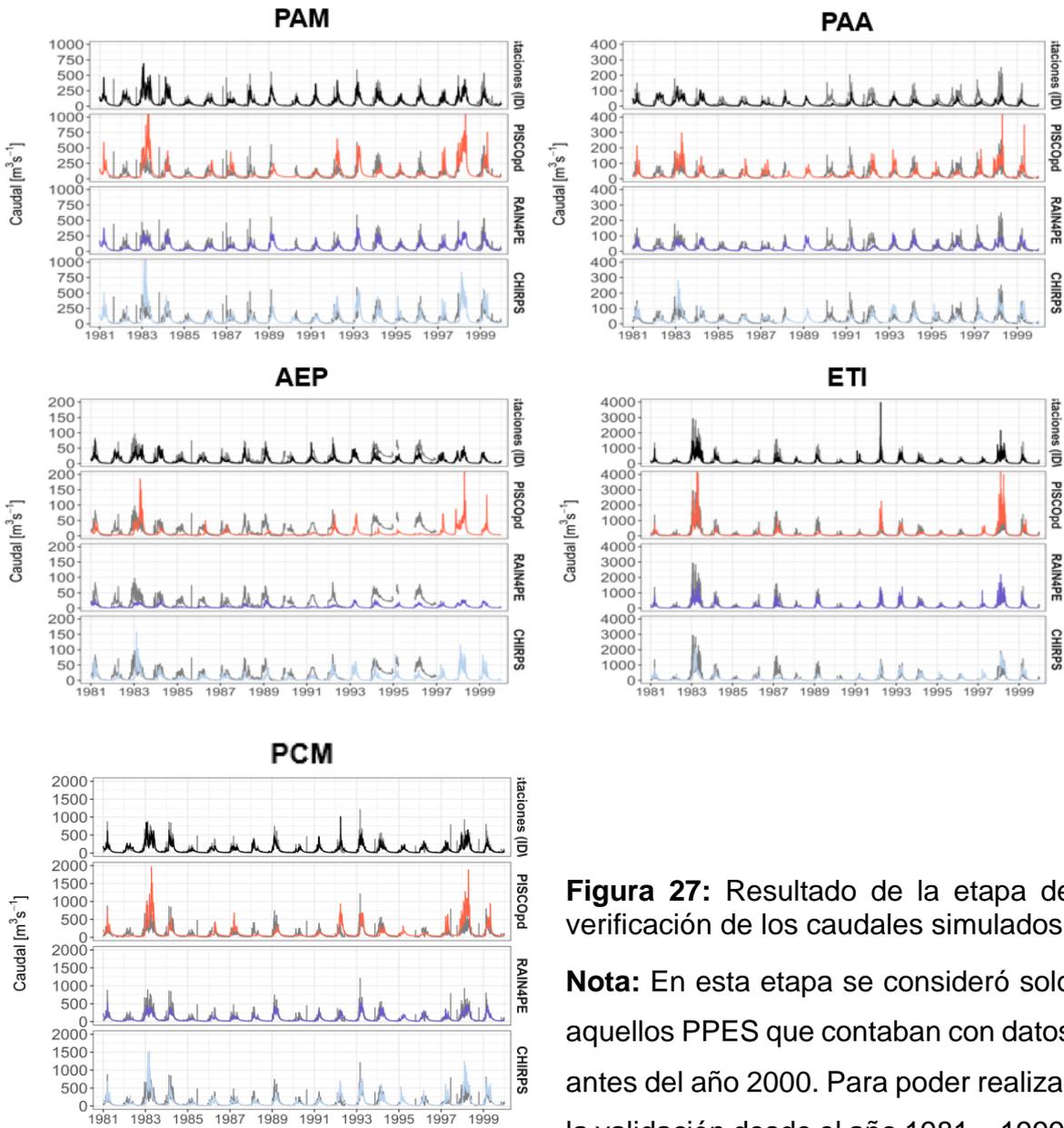


Figura 27: Resultado de la etapa de verificación de los caudales simulados.

Nota: En esta etapa se consideró solo aquellos PPES que contaban con datos antes del año 2000. Para poder realizar la validación desde el año 1981 – 1999,

con el fin de conocer el desempeño de los parámetros calibrados del modelo GR4J por cada PPES, y su desempeño que se muestra en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Resumen de los índices estadísticos de desempeño evaluados para la etapa de verificación.

Estaciones*	Métrica	Estaciones (IDW)	PISCO	RAN4PE	CHIRPS
Puyango AJ Marcabeli (PAM)	NSElog	0.77	0.38	0.77	0.68
	KGE	0.79	0.31	0.7	0.54
	NSE	0.58	-0.63	0.67	0.01
	MAE	22.13	45	20.49	31.5
	RMSE	44.27	87.04	39.26	68.02
	CC	0.81	0.54	0.84	0.66
	PBIAS	-5.4	19.2	-18.6	-0.7
Amarillo en Portovelo (AEP)	NSElog	0.31	-0.01	-0.32	-0.15
	KGE	0.33	0.07	-0.09	0.14
	NSE	0.28	-0.32	-0.26	-0.07
	MAE	8.79	12.17	12.17	11.12
	RMSE	13.98	19.02	19.02	17.1
	CC	0.72	0.31	0.69	0.56
	PBIAS	-47.3	-53.1	-74.39	-61.2
Pindo AJ Amarillo (PAA)	NSElog	-0.28	0.4	0.5	0.49
	KGE	0.31	0.51	0.47	0.6
	NSE	0.14	-0.12	0.36	0.15
	MAE	14.81	15.46	11.84	13.95
	RMSE	24.18	27.66	21	24.12
	CC	0.62	0.56	0.66	0.6
	PBIAS	-47.1	-3.7	-26.6	0.2
Puyango en CPTO. Militar (PCM)	NSElog	0.8	0.41	0.78	0.63
	KGE	0.85	0.2	0.73	0.56
	NSE	0.71	-0.65	0.73	0.09
	MAE	27.85	67.64	26.81	45.51
	RMSE	56.84	136.4	55.54	101.13
	CC	0.86	0.64	0.86	0.7
	PBIAS	-5	31.1	-16.5	0.9
El Tigre (ETI)	NSElog	0.87	0.59	0.84	0.71
	KGE	0.6	0.55	0.57	0.62
	NSE	0.63	0.05	0.6	0.36
	MAE	50.53	89.96	51.45	76.3
	RMSE	142.32	228.04	147.4	187.16
	CC	0.81	0.67	0.79	0.65
	PBIAS	-23.3	6	-24.4	8

Nota: Las unidades de los valores de MAE y RMSE están en m³/seg, mientras que los valores de PBIAS son valores porcentuales (%), las métricas restantes tienen valores adimensionales. (*) Estaciones evaluados para los años 1981 – 1999.

3.2.3. Evaluación hidrológica en un enfoque de firmas hidrológicas

La evaluación se ha desarrollado en los sectores donde se ha realizado la calibración, debido a que existe datos observados en estos sectores.

- a) Sector 1: Una evaluación que sea precisa en este sector ha sido una ardua labor, debido a la escasez de información observada con la que validar estos resultados, como ya se ha venido mencionando, sin embargo, se han tenido resultados considerables, aquí el modelo RAIN4PE y CHIRPS son los que tienen valores cercanos a los resultados en las firmas evaluados en los caudales observados, el producto obtenido de “Estaciones (IDW)” sigue siendo el mejor producto en este sector. Particularmente todos los productos han sobrestimado en un 20% el índice de flujo base (**Figura 28**), el cual es importante para conocer el comportamiento a largo plazo de posibles sequias hidrológicas.

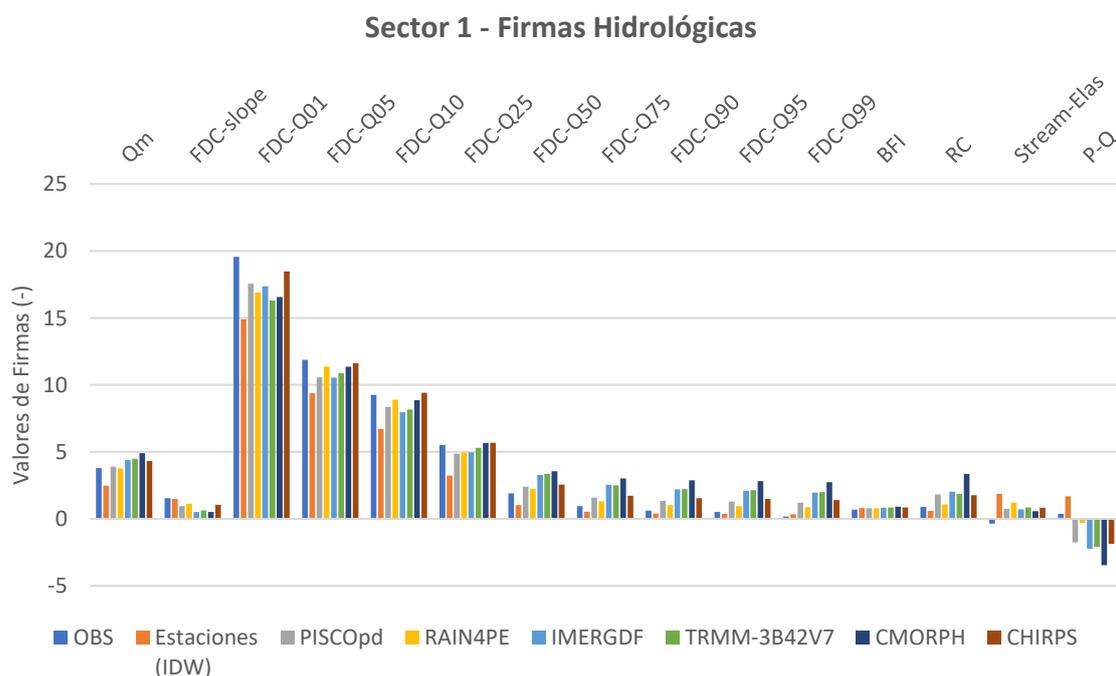


Figura 28: Comparativas de firmas hidrológicas evaluadas en el Sector 1.

b) Sector 2: El Producto de RAIN4PE ha podido representar en un 85% la totalidad de las firmas evaluadas, 70% para el producto obtenido de la interpolación, y 65% para el producto de CHIRPS. La proporción de escorrentía (RC) en este sector indica que es una zona con buena permeabilidad al tener un valor de 0.41 en promedio de los 3 productos con mejor similitud al observado, por lo tanto, indica que más del 60% de la precipitación se está evaporando en esa zona, donde la vegetación es densa y con facilidad a la delimitación de posibles zonas de riesgo de inundación.

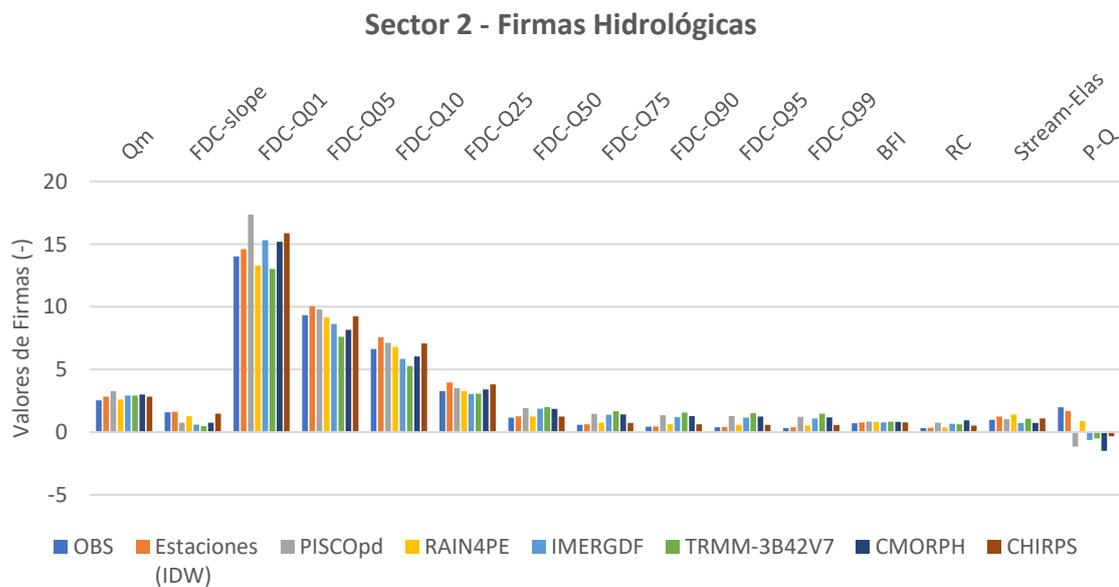


Figura 29: Comparativas de firmas hidrológicas evaluadas en el Sector 2.

c) Sector 3: Considerando los resultados de los anteriores sectores solo el producto de RAIN4PE y el producto interpolado logra tener mejor similitud en la mayoría de las firmas, pero CHIRPS sigue siendo de igual forma el tercer producto que mejor representa las mismas, considerando que CHIRPS no es un producto que ha sido corregido con datos observados.

El resultado como se muestra en la **Tabla 17**, indica que los productos de RAIN4PE, Estaciones (IDW) y CHIRPS son los mejores considerandos un umbral de producto aceptable de ≥ 0.97 CC.

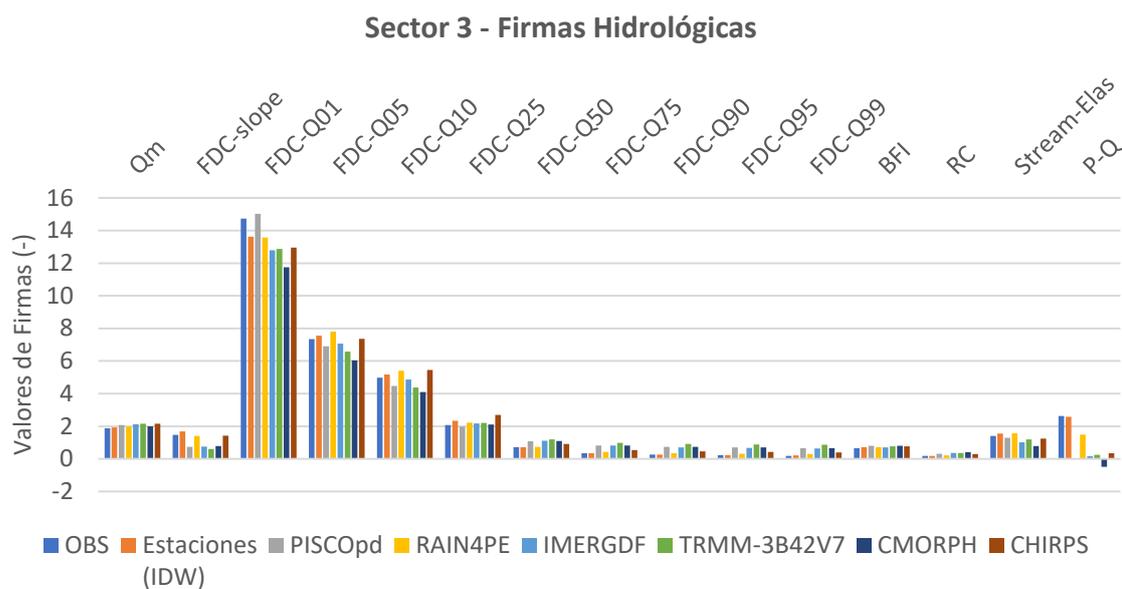


Figura 30: Porcentajes de sobrestimación de los valores observados en cuanto a firmas hidrológicas evaluadas - Sector 3.

Tabla 17. Valores de Pearson para las firmas hidrológicas evaluadas en los sectores.

PPES	Valores del coeficiente de Pearson (CC)
Estaciones (IDW)	0.97
PISCOpd	0.96
RAIN4PE	0.99
IMERGDF	0.96
TRMM-3B42V7	0.96
CMORPH	0.93
CHIRPS	0.98

Esto permitirá extrapolar los resultados obteniendo el promedio de la suma de estos mejores productos para poder conocer cómo se desenvuelven las firmas en cada subcuenca, lo que permitirá poder tener un mayor entendimiento de su aplicación.

La **Figura 31** muestra la distribución espacial de los resultados extrapolados producto de los 3 mejores productos de precipitación estimada por satélite evaluados en las subcuencas, de esta imagen podemos inferir que el caudal medio (Q_m) es moderado en cuencas de cabecera, mientras que se intensifica en la parte media y baja como es de esperarse. El índice de flujo base es mayor en cuencas de la parte alta contrariamente a las subcuencas en la parte baja, los percentiles del caudal tienen igual distribución espacial pero distintos valores, esto nos permitirá caracterizar los eventos de alta y baja duración del caudal. La diferencia entre la precipitación y el caudal es mayor en la parte baja lo que indica zonas poco permeables y propensas a inundaciones; Por último pero no menos importante la elasticidad de flujo, índice o firma hidrológica que nos permite conocer en un contexto de cambio climático la respuesta de la cuenca frente a cambios de precipitaciones, vemos que la intensidad es mayor en la mayoría de las cuencas de cabecera, lo que es comprensible ya que de ellas se deriva toda la escorrentía superficial generada en la cuenca.

**MAPAS DE FIRMAS HIDROLÓGICAS, PROCEDENTES DE LOS 3 MEJORES PPES
EN LA CUENCA PUYANGO - TUMBES**

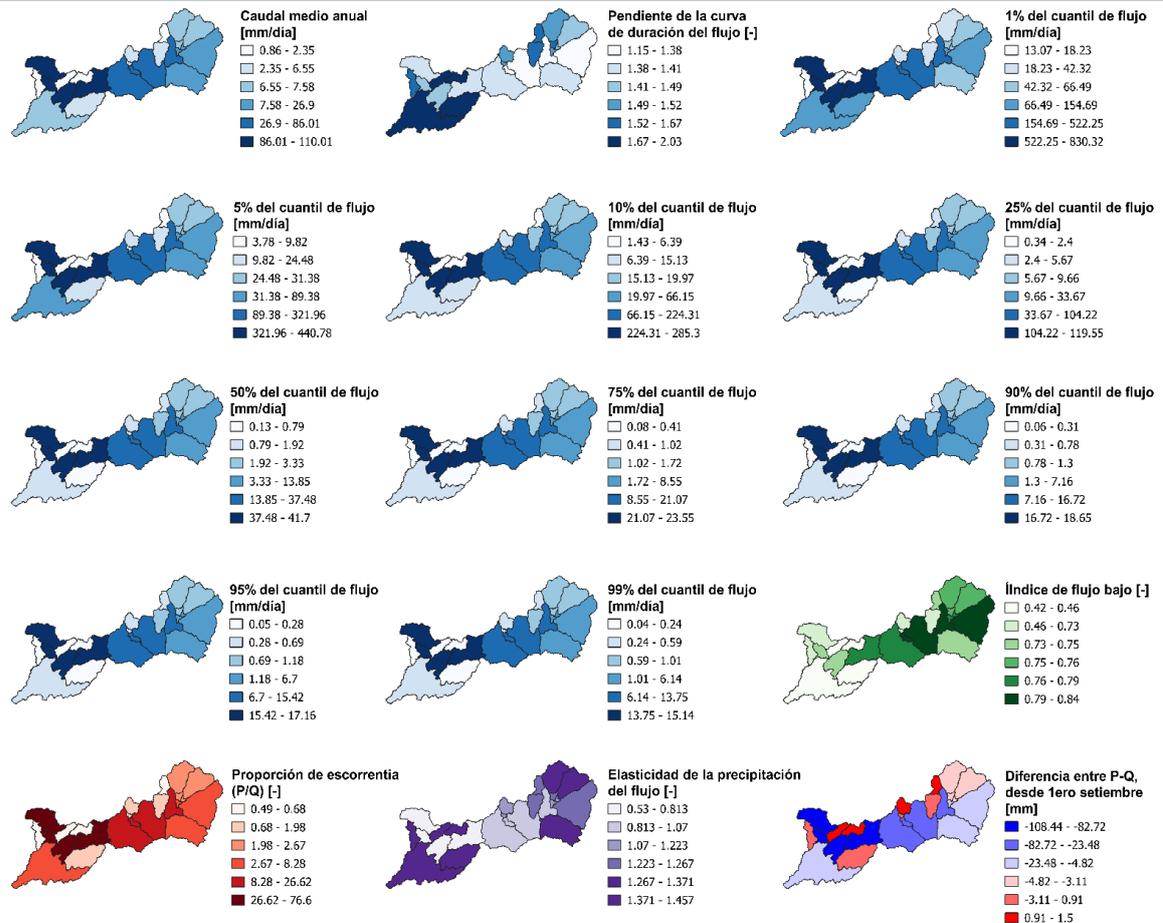


Figura 31: Extrapolación de las 15 firmas hidrológicas en cada subcuenca de la Cuenca Puyango - Tumbes.

3.3. Discusión

La investigación tuvo como objetivo principal conocer que productos que estiman la precipitación mediante satélite (PPES) son los más viables a utilizar para la correcta reproducción de la respuesta hidrológica de la cuenca Puyango – Tumbes mediante la evaluación de firmas hidrológicas; 6 satélites fueron utilizados a distintas resoluciones espaciales (0.05° a 0.25°) en una resolución temporal diaria, el desarrollo de la evaluación se realizó mediante la aplicación de un modelo conceptual (GR4J) en un enfoque semidistribuido.

Los resultados muestran que en cuanto a la evaluación meteorológica de píxel – estación RAIN4PE (0.1°) es el que mejor desempeño muestra con las 16 estaciones en tierra utilizadas para la evaluación del sesgo seguido de PISCOpd (0.1°), RAIN4PE subestima los valores en las estaciones de la parte alta, sin embargo, existe menor error en cuanto a los demás productos evaluados.

Para la evaluación realizada a nivel de subcuencas los resultados muestran que para la época más lluviosa (DEF – MAM) RAIN4PE tiene mejor desempeño junto a PISCOpd y CHIRPS ($0,05^\circ$) en cuanto a porcentaje del sesgo (PBIAS%), mientras que para el error medio cuadrático (RMSE) y la correlación del coeficiente de Pearson (CC) en esta época del año los productos muestran similar desempeño de la cuenca alta y media, para la parte baja estos valores mejoran para el caso de RAIN4PE, PISCOpd y CHIRPS. En la época seca para las subcuencas (JJA – SON), RAIN4PE y CHIRPS son los productos que menor porcentaje de error presentan, mientras que CMORPH (0.25°) tiende a sobrestimar demasiado cuando la evaluación llega a las subcuencas de la parte baja, para la métrica del error medio cuadrático (RMSE) todos los productos presentan valores similares excluyendo a CMORPH que sobrestima los valores; El coeficiente de correlación de Pearson (CC) muestra que solo RAIN4PE y PISCOpd son los productos con mejor correlación a los observados, sin embargo, CHIRPS el producto que mejor correlación presenta excluyendo a los productos que han sido corregidos con datos observados (Fig. 21).

En cuanto a la evaluación en sectores de calibración todos los productos son capaces de representar de manera correcta la estacionalidad de la precipitación (Setiembre – Agosto) pero solo RAIN4PE, PISCOpd y CHIRPS son los productos que estiman de manera similar las magnitudes observadas (Fig. 22). El diagrama de Taylor nos muestra que efectivamente esta inferencia es cierta demostrando que RAIN4PE es por mucho el mejor producto en los 3 sectores teniendo incluso desempeño muy similar en la frecuencia acumulada de distribución de la precipitación.

Este trabajo muestra que la construcción del modelo conceptual GR4J semidistribuido para determinar la aplicación de estos PPES brinda resultados satisfactorios en las simulaciones de los caudales medios diarios en 5 de las 8 estaciones hidrométricas con las que se contaba información (ETI, PAA, PCM, AEP, PAM), el rendimiento del modelo hidrológico en la parte alta se ve afectado debido a la incertidumbre encontrada en la evaluación meteorológica para las forzantes de precipitación de los distintos PPES en dicha cuenca como lo muestra la curva de duración del caudal (**Figura 24**, Sector 1). Cabe señalar que los resultados mostrados en la modelación hidrológica a paso diario se basan únicamente en el modelo hidrológico planteado (GR4J semidistribuido), los resultados pueden ser diferentes utilizando un modelo hidrológico más complejo y con una distribución espacial en cuanto a las forzantes meteorológicas mucho mayores. Cabe mencionar que solo se está haciendo uso de una misma forzante de evapotranspiración potencial (PISCOevap) para correr todos los modelos con diferentes productos de precipitación estimada por satélite, lo que puede traducirse también en una incertidumbre de los resultados del modelamiento hidrológico.

Finalmente, como ya se mencionó el objetivo de la investigación es conocer la aplicabilidad de los diferentes productos evaluados en cuanto a la reproducción de la hidrología en la cuenca a escala temporal diaria, esto ha sido evaluado en un enfoque de firmas hidrológicas, dichas firmas muestran que los productos de RAIN4PE, PISCOpd y CHIRPS muestran la mayor viabilidad para ser aplicables en futuros trabajos o proyectos, estos productos de precipitación estimada por satélite proporcionan resultados extrapolados en cada subcuenca (**Figura 31**) lo que es valioso para conocer y comprender las características de cada subcuenca y los

procesos asociados a la modelación hidrológica; En términos de operatividad para monitoreo de inundaciones, los productos IMERGDF, TRMM-3B42, CMORPH, y CHIRPS son los productos que están en constante actualización de sus valores estimados, sin embargo como ya se han mencionado, el producto de CHIRPS es el más viable, ya que fue el producto que mejor desempeño tuvo en las 3 evaluaciones realizadas. Sin embargo, estos productos pueden ser analizados en futuras investigación con diferentes enfoques analíticos. Las variaciones de las firmas hidrológicas en los demás productos pueden deberse a que dichas firmas son más sensibles en condiciones extremas de caudal, como la pendiente de la curva de duración y los percentiles evaluados, que como se ha mostrado en la evaluación meteorológica estos productos subestiman en su mayoría las precipitaciones.

Por lo tanto, explicaciones plausibles en cuanto a los resultados de las firmas hidrológicas son que dichos resultados se han visto afectados debido a las incertidumbres existentes en los productos de precipitación estimada por satélite, ya que la base de la evaluación de esta investigación fue utilizar estos productos de manera cruda sin ningún tipo de corrección del sesgo, pero a su vez el desempeño de estas puede vincularse a las mediciones de las estaciones hidrológicas en campo.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Los resultados que se han obtenido en esta investigación producto de una evaluación meteorológica e hidrológica; se destaca la viabilidad y aplicabilidad de estos productos en las simulaciones de los caudales medios diarios con el modelo hidrológico conceptual GR4J semidistribuido, las principales conclusiones de estas investigaciones son las siguientes:

- i. En general las estimaciones de la precipitación de los productos satelitales RAIN4PE, PISCOpd y CHIRPS son los más similares en cuanto a los valores observados a diferencia de IMERGDF, TRMM-3B42 y CMORPH a escala diaria y estacional; sin embargo, IMERGDF muestra buen desempeño en el periodo seco (JJA) a diferencia de CHIRPS. Claramente el desempeño es variable teniendo en cuenta la distribución espacial de los valores observados de las estaciones donde el sesgo es mayor en zonas más altas (> 2700 m.s.n.m) donde aquí CHIRPS si es el mejor producto en cuanto al sesgo porcentual (PBIAS). Se constata la dificultad de los satélites para estimar la lluvia en zonas altas basada en conjuntos de datos observados, todos los productos en la zona alta subestiman los valores observados, CHIRPS es el producto que más cercanía tiene en cuanto a magnitudes en los Sectores 2 y 3, sin embargo, para el Sector 1 solo RAIN4PE es capaz de tener una semejanza en magnitud con la lluvia observada.
- ii. En cuanto a los resultados obtenidos de la modelación hidrológica, en los tres sectores tomados en consideración para poder realizar la calibración y validación, se concluye que el mejor producto resultante es RAIN4PE, el cual según las métricas de desempeño evaluadas nos dice que este producto es capaz de representar correctamente las magnitudes y la estacionalidad de los caudales observados; PISCOpd representa mejor los caudales únicamente en la zona Peruana (sector 3), CHIRPS, representa de manera diferente las magnitudes de los caudales, sin embargo,

representa de manera uniforme la estacionalidad en cada uno de los sectores evaluados. Al mismo tiempo se concluye que los parámetros del modelo hidrológico GR4J trata de compensar los sesgos provenientes en los caudales simulados desde la parte alta (Sector 1) lo que puede traducirse a largo plazo en menor desempeño para las demás subcuencas; esta investigación muestra que el producto TRMM-3B42 puede llegar a tener un alto potencial en las simulaciones hidrológicas en caso de realizar una combinación entre CHIRPS y las Estaciones (IDW) de manera experimental para futuras investigaciones.

- iii. En la evaluación de firmas hidrológicas está claro que dentro de la gama de los productos evaluados que no se han visto corregidos con datos observados en la cuenca, CHIRPS es el más representativo en cuanto a estacionalidad y magnitudes en las mayorías de las evaluaciones realizadas, ya que dentro de este enfoque es el que mayor correlación tiene con las firmas observadas, siendo el que mejor representan flujos bajos, flujos medios y flujos altos (**Figura 31**), considerando que CHIRPS es usado como covariable en PISCOpd y al mismo tiempo en RAIN4PE; por lo tanto para la cuenca es el producto “crudo” que mejor aplicabilidad tiene dentro del ámbito de estudio, y que a largo plazo sería bueno poder realizar su corrección con fines operativos y poder así plantear nuevas metodologías y estrategias de mitigación frente a inundaciones, sobre todo en la parte peruana que es la zona que es más vulnerable, ya que entre las entidades de Ecuador y Perú no existe un convenio para poder obtener la información a tiempo casi real.

Estos resultados son importantes y factibles ya que se concluye que el producto CHIRPS para fines de monitoreo puede ser utilizado y así poder instalar un sistema de alerta temprana para la mitigación de estos desastres naturales ocurridos en la cuenca, y de igual manera poder discretizar nuevas firmas hidrológicas que a futuro se pueda hacer el pronóstico de sequías hidrológicas. Al mismo tiempo se encontró que el producto de la interpolación puede representar correctamente la respuesta hidrológica de la cuenca de manera adecuada para fines de estudios de balance

hídrico en la cuenca, pero no en un enfoque de operatividad; Claro está que estos resultados parten de la aplicación de un modelo conceptual.

RECOMENDACIONES

En el epílogo de la presente investigación, se plantean algunas recomendaciones para estudios futuros en la cuenca. Es necesario evaluar mejores alternativas dentro de la metodología propuesta, para favorecer el desarrollo de nuevas líneas de investigación las cuales deben ser de la misma temática evaluada en esta investigación.

- i. Se recomienda realizar la corrección del sesgo de la gama de productos “crudos” evaluados con el fin de poder tener una evaluación más concisa de la aplicabilidad de estos productos de precipitación estimada por satélite, y considerar la hipótesis de que con la corrección del sesgo mejora la capacidad de estos productos en el modelamiento hidrológico considerando regímenes climáticos distintos.
- ii. Considerar los productos “real time” para poder evaluarlos como alternativas en la aplicación de sistemas de alerta temprana, con el fin de simular eventos extremos en la cuenca.
- iii. La buena resolución de CHIRPS 0.05° hace factible su consideración para la modelación hidrológica, por lo tanto, se recomienda disgregar los diferentes productos de precipitación que se evalúen en la cuenca Puyango - Tumbes para una evaluación de igualdad de condiciones y mejorar la factibilidad de sus usos en los diferentes ámbitos de gestión hídrica en la cuenca y tomas de decisiones.
- iv. Evaluar diferentes modelos hidrológicos en la cuenca que consideren los procesos físicos de la misma, con el fin de tener un análisis más profundo de las distintas componentes hidrológicas en la cuenca.

- v. Considerar nuevos algoritmos de calibración y análisis de sensibilidad de los resultados para conocer más a fondo sus aplicaciones, agregando nuevas firmas hidrológicas para poder considerar que productos representa mejorar cada parámetro hidrológico de la cuenca.

- vi. Tener en cuenta que los hidrogramas observados en los años 90s generar incertidumbre en cuanto a la verificación, incluso en la validación, por lo tanto, se hace la recomendación de continuar calibrando los caudales simulados en la cuenca con los periodos más recientes y validar con los más antiguos a fin de poner obtener resultados favorables y acorde a lo observado; realizar visitas de campo para poder una idea consistente de estos hidrogramas, y para las entidades pertinentes se recomienda mejorar el monitoreo y lectura de estos caudales para que sean confiables y no generen mucho sesgo entre lo simulado y observado, y así brindar información útil para la toma de decisiones en la gestión.

CAPÍTULO V

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Addor, N., Nearing, G., Prieto, C., Newman, A. J., le Vine, N., & Clark, M. P. (2018). A Ranking of Hydrological Signatures Based on Their Predictability in Space. *Water Resources Research*, 54(11). <https://doi.org/10.1029/2018WR022606>
2. Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., & Clark, M. P. (2017). The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 21, 5293–5313. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017>
3. Alazzy, A. A., Lü, H., Chen, R., Ali, A. B., Zhu, Y., & Su, J. (2017). Evaluation of Satellite Precipitation Products and Their Potential Influence on Hydrological Modeling over the Ganzi River Basin of the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3695285>
4. Andrade Pillaga, O. F. (2016). *Evaluación de imágenes satelitadas de precipitación GPM (Global Precipitation Measurement) a escala sub-diaria para la provincia del Azuay [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]*. Repositorio Institucional. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24214>
5. Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785.
6. Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico, Nota Técnica 001 - SENAMHI-DHI-2017*. Senamhi, Lima, Peru.
7. Aybar Camacho, C. L. (2016). *Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: caso de estudio río Vilcanota [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5936>

8. Barbosa, A. C. (2021). *Verificación de productos satelitales con base a estaciones meteorológicas y modelación lluvia esorrentía [Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes]*. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/50730>
9. Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*.
10. Cerrudo, C. G., Diaz, G. M., Juárez, S. H., & Ferreira, L. J. (2017). ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESPACIO TEMPORAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR EL SATÉLITE TRMM (3B42RT) Y EL CAUDAL MEDIO DIARIO EN LA CUENCA DEL RÍO IGUAZÚ. *Metereologica*, 42(1), 39–52. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2017000100003&lng=es&tlng=es.
11. Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2000). *Hidrología Aplicada* (M. E. Suarez R., Ed.). NOMOS S.A (Original work published on 1994).
12. Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
13. Cuadros Loayza, J. A. (2020). *Modelamiento hidrológico de la sub cuenca del Río Pachachaca con precipitación proveniente de satélite, Departamento de Apurímac [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]*. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/11178>
14. Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* 1993 76:3, 76(3), 501–521. <https://doi.org/10.1007/BF00939380>
15. Estrela, T. (1992). Metodología y Recomendaciones para la Evaluación de Recursos Hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos. *Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid, España. 52 p.*
16. Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2007). *Diseño hidrológico* (2da ed.). Zeta Editores.

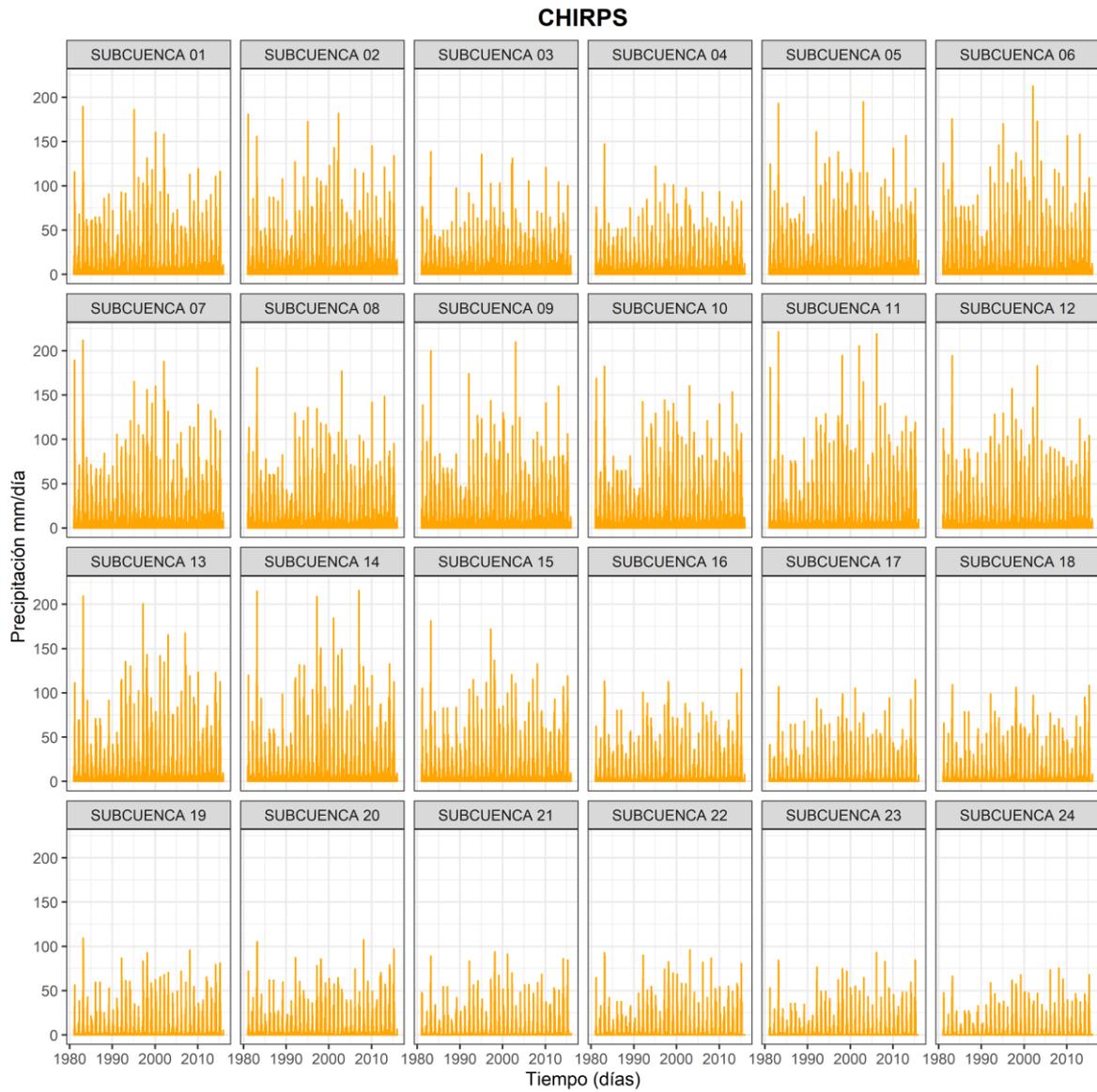
17. Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
18. Fuertes Melchor, N. C. (2020). *Aplicación y evaluación de modelos hidrológicos GR4J y SAC-SMA para generación de caudales medios diarios en la cuenca del río Huallaga [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/15840>
19. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
20. Gupta, H. v., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003>
21. Gutiérrez Caiza, C. (2014). *Hidrología básica y aplicada*. Abya-Yala/UPS.
22. Hamza, O., Boudhar, A., Yves, T., Jarlan, L., Benabdelouhab, T., Hanich, L., el Meslouhi, M. R., & Chehbouni, A. (2017). Evaluation of TRMM 3B42 V7 rainfall product over the Oum Er Rbia watershed in Morocco. *Climate*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/cli5010001>
23. Huamán Aguirre, R. E. (2018). *Respuesta hidrológica distribuida mediante precipitación por satélite TRMM en la cuenca del río Mantaro [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]*. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1802>
24. 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). <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>

25. Jehn, F. U., Bestian, K., Breuer, L., Kraft, P., & Houska, T. (2019). Clustering CAMELS using hydrological signatures with high spatial predictability. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-129>
26. Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3). [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)
27. Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/ADGEO-5-89-2005>
28. Levizzani, V., & Cattani, E. (2019). Satellite remote sensing of precipitation and the terrestrial water cycle in a changing climate. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 19). <https://doi.org/10.3390/rs11192301>
29. Llauca, H., Lavado-casimiro, W., León, K., Jimenez, J., Traverso, K., & Rau, P. (2021). Assessing near real-time satellite precipitation products for flood simulations at sub-daily scales in a sparsely gauged watershed in Peruvian andes. *Remote Sensing*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/rs13040826>
30. McMillan, H. K. (2021). A review of hydrologic signatures and their applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1). <https://doi.org/10.1002/wat2.1499>
31. Mejía Marcacuzco, J. A. (2012). *Hidrología aplicada*.
32. Melišová, E., Vizina, A., Staponites, L. R., & Hanel, M. (2020). The Role of Hydrological Signatures in Calibration of Conceptual Hydrological Model. *Water* 2020, Vol. 12, Page 3401, 12(12), 3401. <https://doi.org/10.3390/W12123401>
33. Mostafaie, A., Forootan, E., Safari, A., & Schumacher, M. (2018). Comparing multi-objective optimization techniques to calibrate a conceptual hydrological model using in situ runoff and daily GRACE data. *Computational Geosciences*, 22(3). <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9726-8>
34. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. v. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

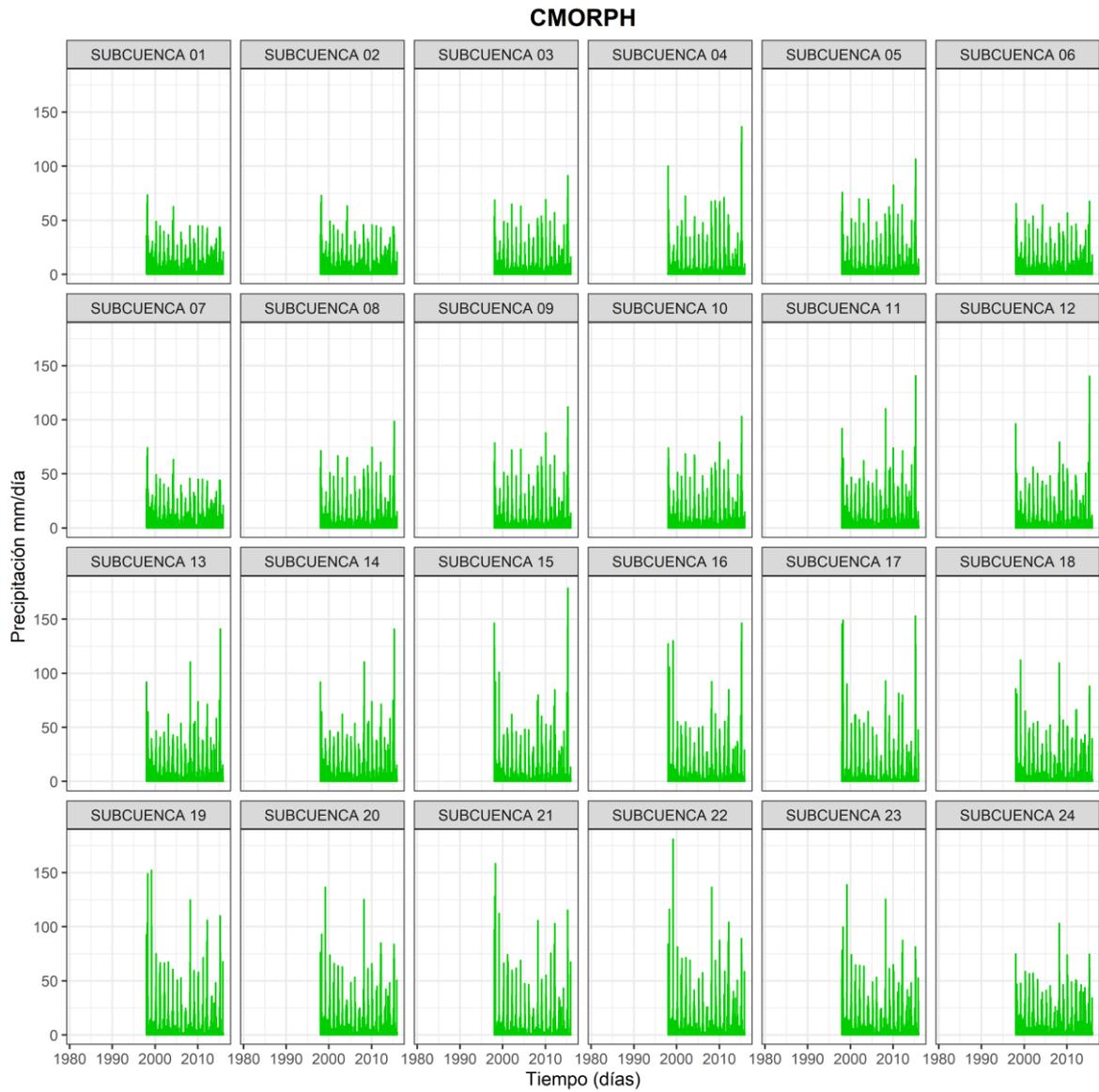
35. Obando, O. F., & Sarmiento, J. S. (2015). *GUÍA SINTÉTICA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DIARIOS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL A NIVEL NACIONAL Basado en productos satelitales – TRMM ESCOR*.
36. Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
37. Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices* (Vol. 640). Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
38. Quincho Olazábal, J. (2015). *Estudio experimental del transporte de sedimentos en suspensión y fondo y comparación con fórmulas empíricas en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]*. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/921>
39. Taylor, K. E. (2005). *Taylor Diagram Primer*.
40. Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 84, Issue 9). <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>
41. Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos* (Vol. 678). Editora da UFRGS Porto Alegre.
42. Ureña, J. E., Vallejos, A. G., Saavedra, O. C., & Escalera, A. C. (2018). Evaluación de la precipitación distribuida en la cuenca Katari basado en tecnología satelital y productos derivados. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 18(1), 35–51. <https://doi.org/10.23881/IDUPBO.018.1-31>
43. Westerberg, I. K., & Mcmillan, H. K. (2015). Uncertainty in hydrological signatures. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 19, 3951–3968. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3951-2015>
44. Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Hydrological modeling using observed and satellite precipitation datasets for the Ilave River basin, 2011-2015 period, Puno, Peru. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 85–101. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04>

ANEXOS

Anexo 1. Distribución temporal de la precipitación para el producto CHIRPS en las 24 subcuencas.

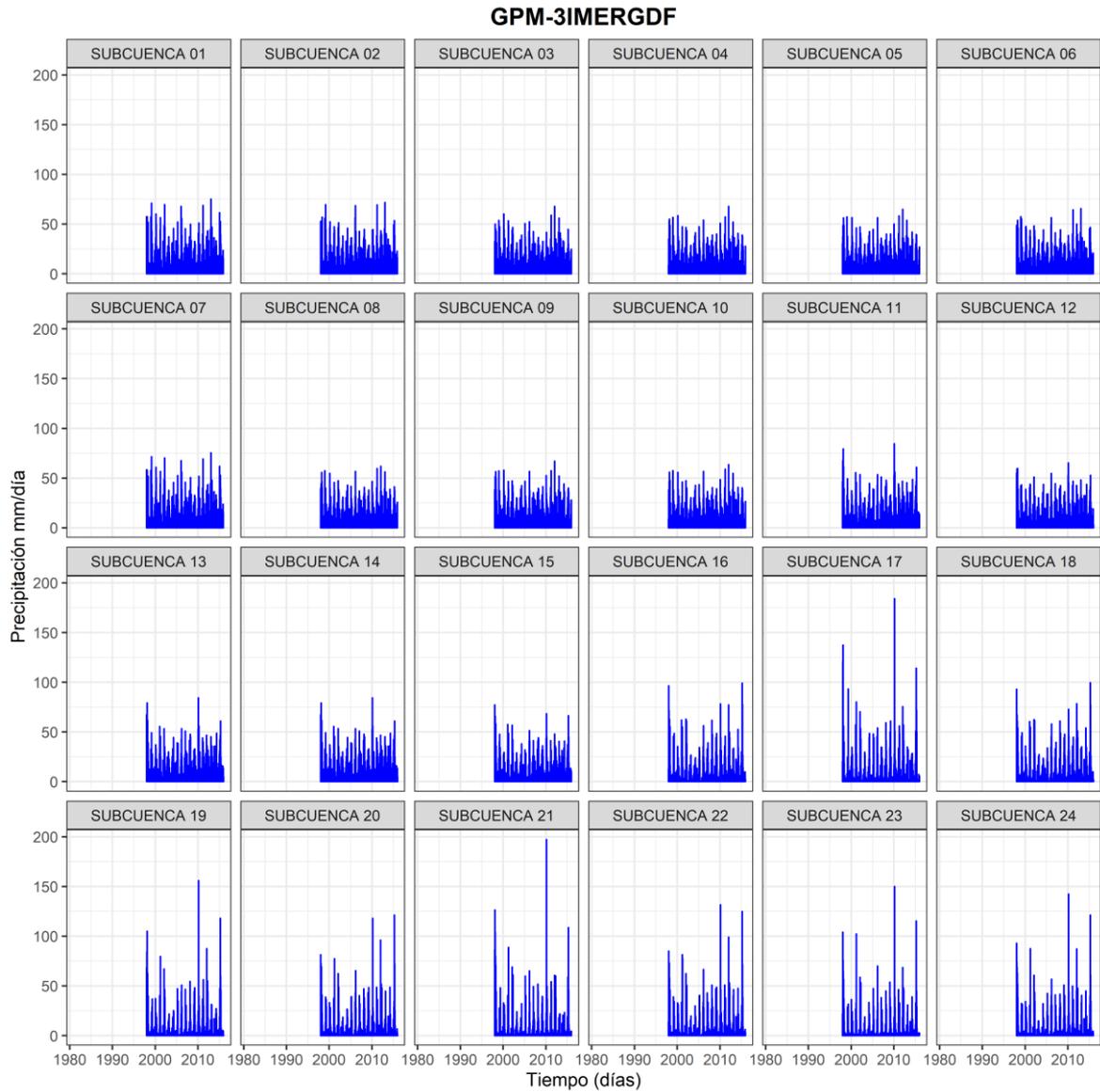


Anexo 2. Distribución temporal de la precipitación para el producto CMORPH en las 24 subcuencas.



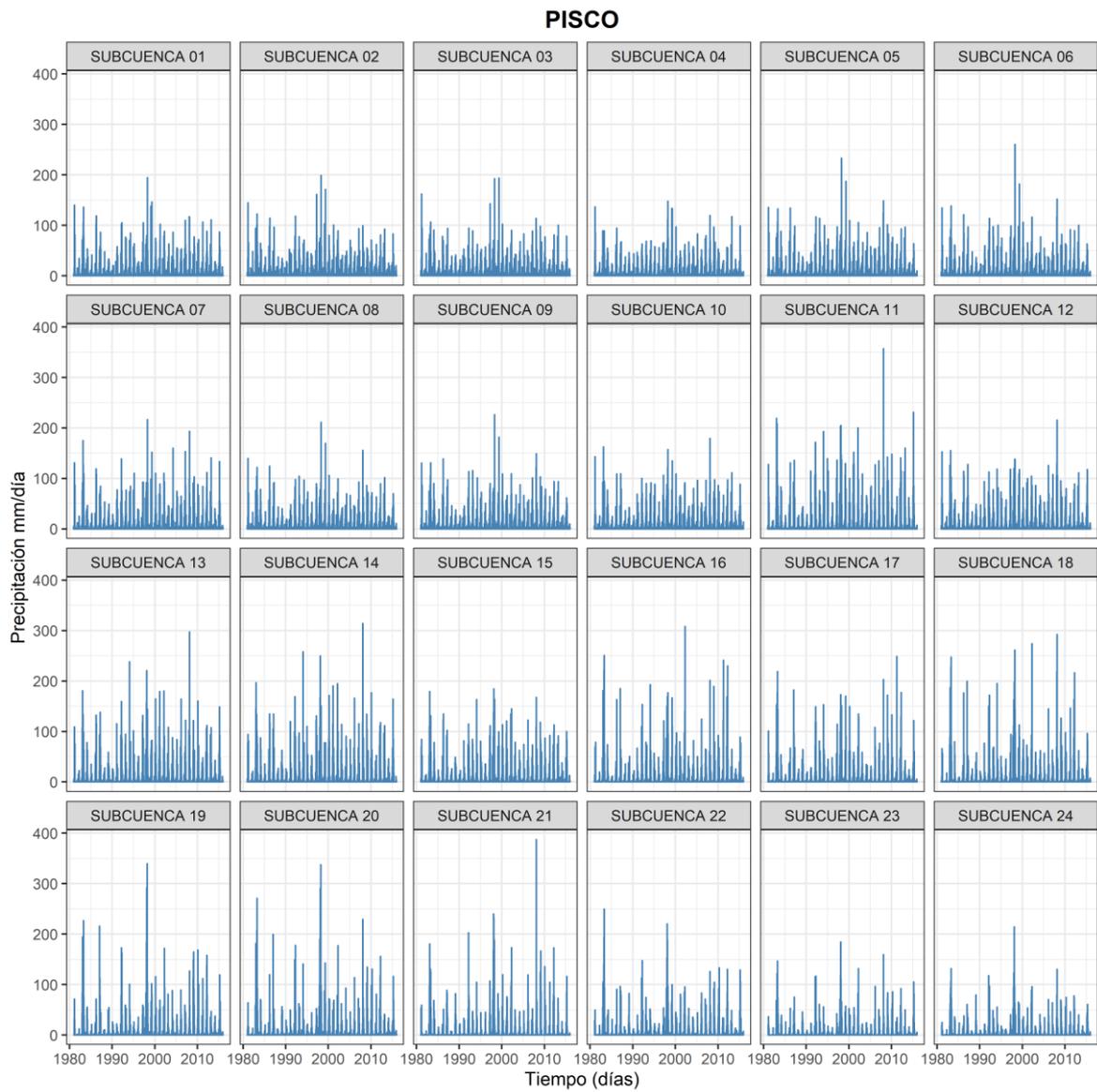
Nota: Este producto no cuenta con información desde 1981, como se visualiza en este anexo, por ello para la evaluación de la tesis se ha utilizado un periodo común de los datos.

Anexo 3. Distribución temporal de la precipitación para el producto TRMM-3B42DF en las 24 subcuencas.

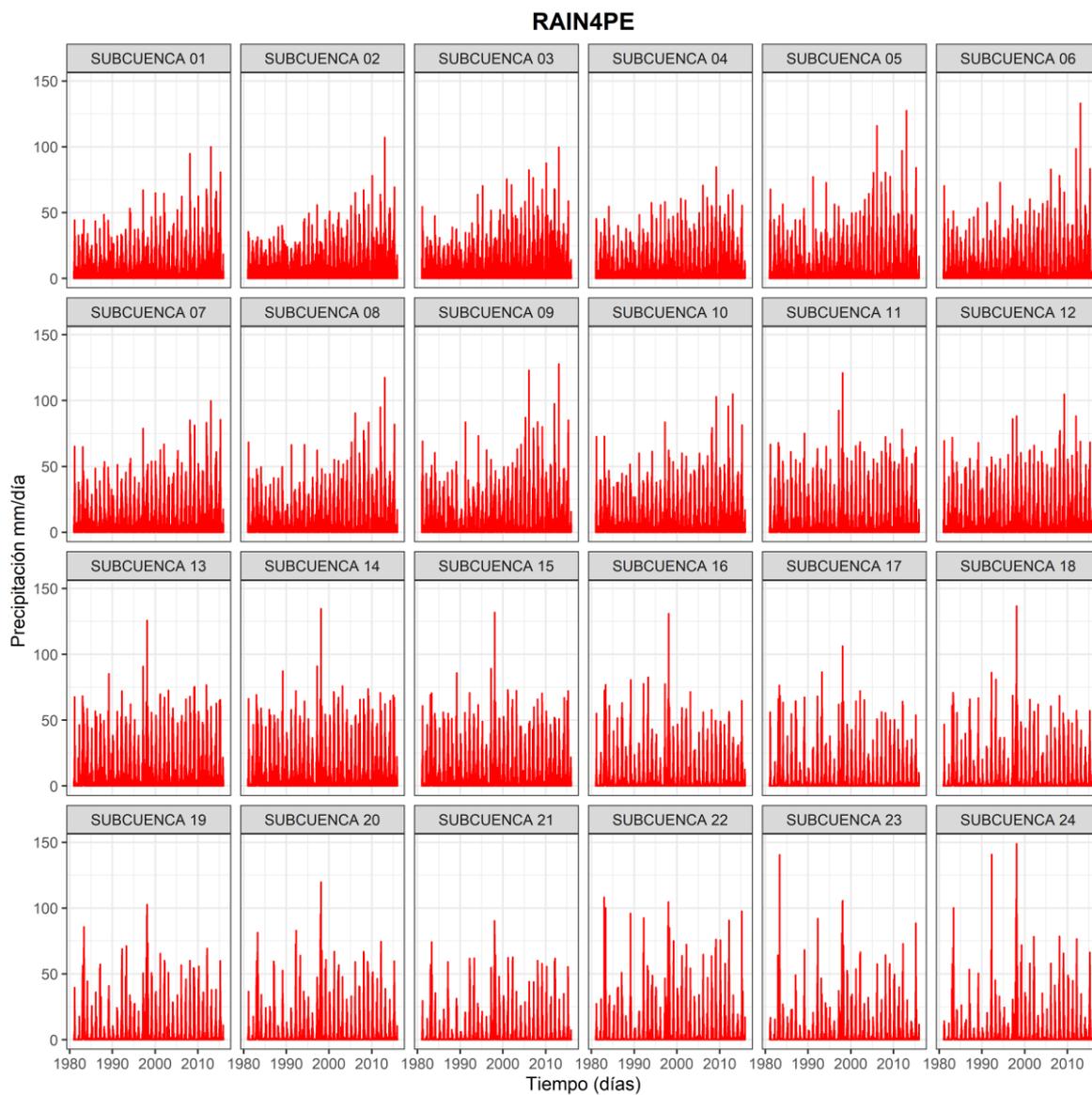


Nota: Este producto no cuenta con información desde 1981, como se visualiza en este anexo, por ello para la evaluación de la tesis se ha utilizado un periodo común de los datos.

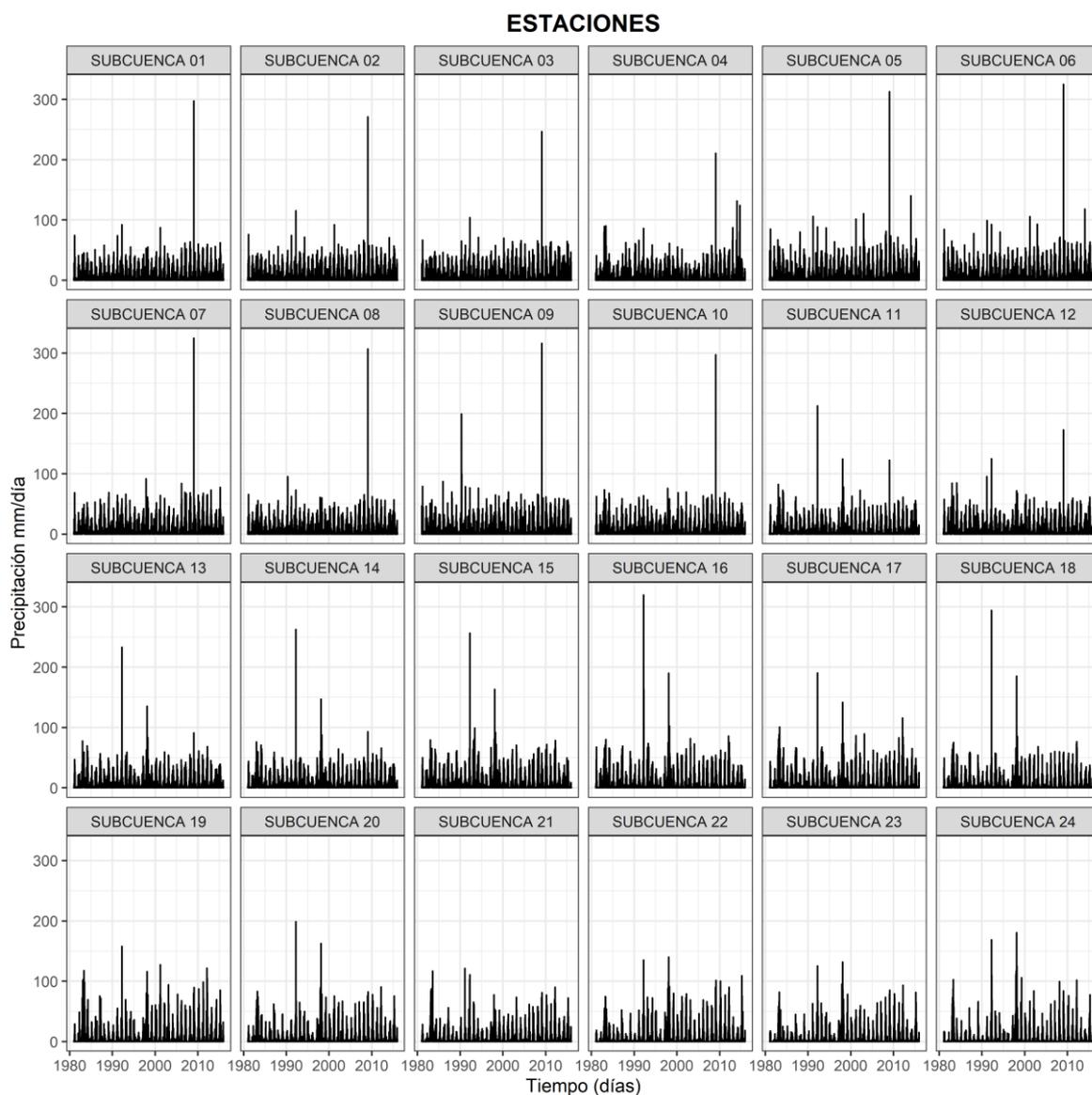
Anexo 4. Distribución temporal de la precipitación para el producto PISCOpd en las 24 subcuencas.



Anexo 5. Distribución temporal de la precipitación para el producto RAIN4PE en las 24 subcuencas.

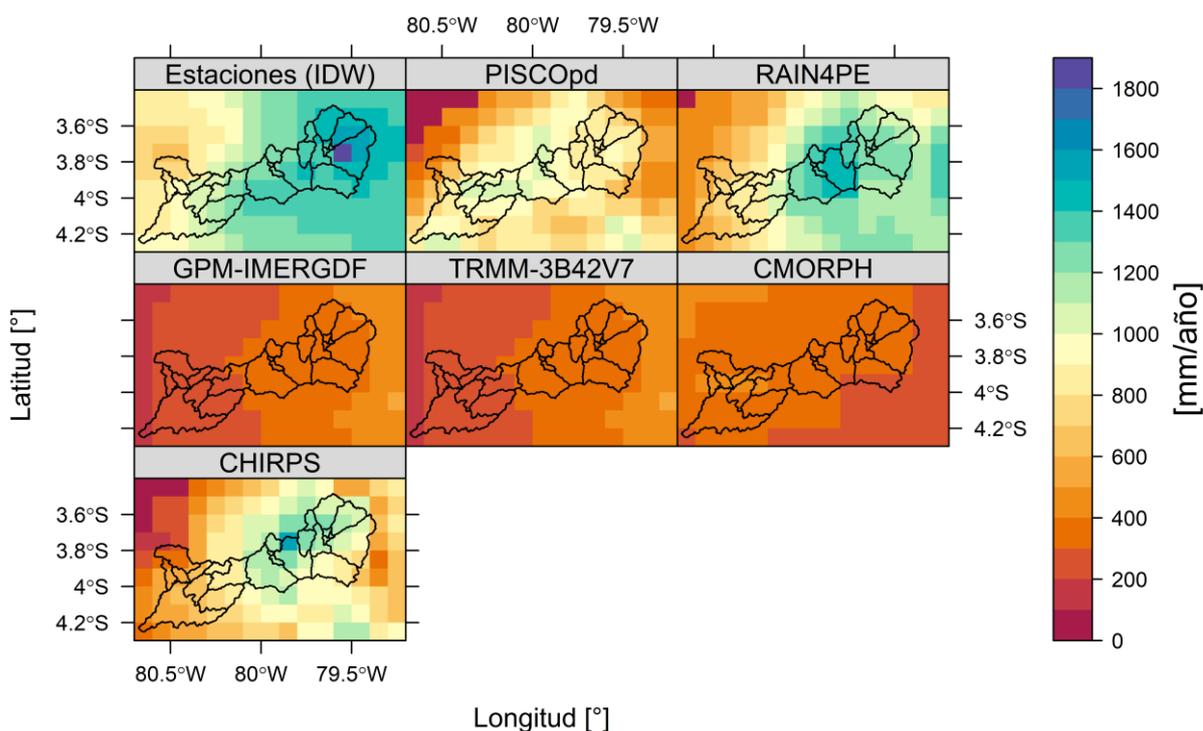


Anexo 6. Distribución temporal de la precipitación para la interpolación de las Estaciones en las 24 subcuencas.



Nota: Cabe recalcar que estos datos no han pasado por un control de calidad, por ello el pico extremo en el año 2009.

Anexo 7: Precipitación media anual (mm/año) para los diferentes productos en evaluación incluida la interpolación de los datos observados.



Anexo 8. Correlación de Pearson, evaluación estación - píxel por cada PPES

ESTACIONES	PPES					
	PISCOpd	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
El Tigre	0.78	0.96	0.33	0.32	0.2	0.18
Cabo Inga	0.92	0.96	0.38	0.39	0.33	0.29
Matapalo	0.52	0.92	0.27	0.23	0.21	0.20
Rica Playa	0.90	0.96	0.33	0.31	0.2	0.19
Cazaderos	0.21	0.26	0.13	0.17	0.32	0.26
Balsas	0.26	0.47	0.30	0.33	0.23	0.17
Pte. Puyango	0.33	0.59	0.33	0.35	0.25	0.19
Portovelo	0.30	0.95	0.35	0.38	0.48	0.28
Salati	0.30	0.45	0.34	0.37	0.3	0.22
Buenavista	0.14	0.35	0.18	0.22	0.17	0.13
Zaruma	0.24	0.41	0.29	0.28	0.25	0.22
Chaguarpamba	0.14	0.21	0.13	0.17	0.1	0.13
El Salado	0.28	0.45	0.31	0.34	0.29	0.21
Alamor	0.33	0.83	0.29	0.28	0.23	0.29
Piñas	0.22	0.34	0.27	0.25	0.22	0.20
Chaguarguayco	0.55	0.69	0.27	0.23	0.34	0.26

Nota: Coloraciones azules indican una alta correlación con los valores observados de las estaciones en tierra, contrariamente a las coloraciones rojas que indican una baja correlación con las estaciones en tierra.

Anexo 9. Sesgo porcentual, evaluación estación - píxel por cada PPES.

ESTACIONES	PPES					
	PISCOpd	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
El Tigre	-19.00	-0.70	14.80	16.70	40.30	-57.70
Cabo Inga	-17.00	-16.60	-39.00	-37.40	-18.60	-42.30
Matapalo	-15.40	-13.80	-6.60	-21.20	3.70	8.90
Rica Playa	-7.70	-1.30	-1.30	-0.80	19.10	-32.00
Cazaderos	129.70	96.00	39.00	30.40	85.80	79.20
Balsas	-33.20	13.50	-34.00	-39.40	-42.80	27.30
Pte. Puyango	-16.70	16.20	-22.20	-37.60	-27.90	13.60
Portovelo	-31.30	4.10	-22.80	-34.70	-52.60	-3.20
Salati	-64.30	-44.10	-62.70	-65.30	-77.20	-57.60
Buenavista	-54.30	-25.20	-46.50	-54.20	-70.60	-42.90
Zaruma	-53.10	-16.00	-48.80	-49.20	-64.60	-22.90
Chaguarpamba	-33.90	5.90	-28.00	-30.90	-52.10	-18.60
El Salado	-32.90	20.90	-21.60	-25.10	-54.40	10.70
Alamor	-37.40	-9.40	-42.90	-53.90	-55.80	-28.30
Piñas	-48.10	-2.90	-44.80	-36.30	-58.90	-14.80
Chaguaguayco	-32.90	-36.50	-49.60	-58.80	-47.90	-46.30

Anexo 10. Raíz del error medio cuadrático, evaluación estación - píxel por cada PPES.

ESTACIONES	PPES					
	PISCO	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
El Tigre	3.88	1.85	6.52	7.03	7.50	6.18
Cabo Inga	3.55	3.10	8.58	8.64	9.54	9.29
Matapalo	7.73	3.36	7.98	8.17	8.32	10.55
Rica Playa	3.30	2.49	7.55	8.07	8.54	8.22
Cazaderos	11.38	7.81	8.02	7.72	7.94	8.83
Balsas	11.13	9.12	9.11	9.27	10.11	17.01
Pte. Puyango	11.04	7.68	8.61	8.93	9.83	13.33
Portovelo	10.2	2.69	7.68	8.44	7.75	12.30
Salati	13.73	12.15	12.64	12.83	13.43	14.96
Buenavista	13.75	11.60	10.19	12.15	12.41	14.72
Zaruma	11.80	10.85	10.76	10.88	11.18	13.98
Chaguarpamba	14.47	13.83	13.83	13.63	14.01	15.72
El Salado	8.78	8.49	7.80	7.87	7.83	12.09
Alamor	12.66	6.73	11.76	12.04	12.54	13.33
Piñas	11.44	10.63	9.91	10.34	10.07	13.66
Chaguaguayco	9.85	8.32	10.96	11.41	10.95	11.56

Anexo 11. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto PISCOpd.

Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS (%)	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS (%)	RMSE [-]	CC [-]
1	-65.7	13.57	0.18	-38.1	13.65	0.26	-59.9	1.34	0.31	-13.1	2.84	0.28
2	-67.4	13.56	0.16	-44.4	13.47	0.26	-57	1.37	0.29	4.8	3.58	0.24
3	-62.8	14.11	0.19	-49.7	13.53	0.3	-62.7	1.59	0.26	-14	3.6	0.25
4	-56.9	13.13	0.22	-39.7	11.91	0.3	-76.1	1.63	0.29	-36.5	5.25	0.2
5	-63.4	15.62	0.18	-40.9	14.67	0.25	-63.6	1.52	0.31	-24.6	3.22	0.32
6	-65.5	15.05	0.19	-39.5	14.17	0.25	-62.4	1.43	0.33	-26.1	2.87	0.34
7	-58.7	14.98	0.18	-28.3	15.1	0.27	-68.2	1.61	0.27	-28	2.31	0.33
8	-59	13.4	0.21	-34.7	12.49	0.31	-71.5	1.33	0.37	-14.5	2.59	0.35
9	-58.1	14.35	0.18	-35.5	13.65	0.28	-62.6	1.28	0.37	-4.3	2.81	0.35
10	-57.6	13.64	0.22	-32	13.1	0.31	-75.4	1.38	0.34	-14.8	2.43	0.33
11	-22.6	17.12	0.29	-12.2	14.95	0.39	-80.7	0.91	0.45	-49.4	1.66	0.38
12	-44.7	13.52	0.28	-24.7	12.89	0.37	-84.7	1.89	0.3	-42.5	2.22	0.33
13	-26.1	16.42	0.3	-17.3	13.1	0.43	-83.3	0.98	0.45	-44.6	1.69	0.4
14	-20.4	17.38	0.3	-13.8	13.22	0.43	-83.9	0.86	0.49	-43.9	1.56	0.41
15	-32.7	13.47	0.32	-22.2	12.46	0.44	-80.9	0.81	0.51	-26.2	1.57	0.44
16	-24.2	13.02	0.42	-8.8	14.98	0.45	-75.2	0.51	0.7	2.1	0.94	0.59
17	-29	12.06	0.42	-20.9	12.91	0.55	-82.9	0.74	0.55	-19.3	0.97	0.62
18	-11.9	12.32	0.51	-4.2	13	0.54	-74.8	0.51	0.73	-13.1	0.61	0.67
19	-8.4	9.89	0.67	-16.7	10.51	0.68	-81.1	1	0.49	-35.2	0.82	0.53
20	2.6	8.35	0.77	-7.8	8.49	0.75	-76.1	0.87	0.61	-29.2	0.52	0.61
21	-6.3	12.75	0.56	-6.9	10.51	0.64	-90.1	0.96	0.5	-70.9	0.57	0.62
22	-10.4	3.4	0.95	-11.7	4.71	0.92	-79.1	1.46	0.52	-53.2	0.53	0.54
23	-30.5	4.12	0.89	-24	4.57	0.89	-83.4	0.99	0.52	-74.8	0.39	0.6
24	-21	2.97	0.94	-23.5	3.14	0.94	-67.8	0.41	0.73	-52.6	0.2	0.75
Promedio	-37.53	12.43	0.40	-24.90	11.88	0.47	-74.31	1.14	0.45	-30.16	1.91	0.44
PBIAS	-41.72											
RMSE	6.84											
CC	0.44											

Anexo 12. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto RAIN4PE.

Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]
Sub_1	-18.9	12.89	0.32	-14	9.56	0.53	9.2	1.6	0.35	9.4	2.96	0.27
Sub_2	-26.5	12.92	0.29	-26.7	10.16	0.49	43.8	2.03	0.26	36.5	3.79	0.23
Sub_3	-28.9	13.6	0.28	-31.2	11.6	0.42	38.8	2.41	0.16	44.3	4.48	0.21
Sub_4	-17.9	12.52	0.29	-6.4	9.95	0.46	-29.5	1.93	0.17	4.2	5.46	0.19
Sub_5	-19.1	15.55	0.25	-7.8	12.19	0.47	-15.2	1.45	0.49	-21.3	3.32	0.32
Sub_6	-15.5	14.45	0.31	-5.1	10.46	0.56	-16.6	1.22	0.6	-17.5	2.98	0.35
Sub_7	-10.9	14.01	0.28	4.2	11.08	0.47	-18.4	1.79	0.26	2.2	2.61	0.25
Sub_8	-8.2	13.36	0.3	4.1	10.44	0.52	-31.3	1.44	0.36	-7.5	2.76	0.31
Sub_9	-6.5	14.94	0.24	2.8	12.17	0.45	-16.5	1.39	0.42	-6.9	2.96	0.32
Sub_10	-4.4	13.05	0.33	14	10.64	0.52	-30.7	1.57	0.27	1.8	2.53	0.29
Sub_11	-0.7	9.19	0.55	22.7	9.17	0.65	-27.6	1.13	0.28	-14.9	1.94	0.33
Sub_12	-2	11.11	0.43	16.9	10.56	0.55	-47.5	2.05	0.15	-4.7	2.61	0.28
Sub_13	2.1	9.15	0.58	21.5	9.16	0.67	-31.6	1.18	0.27	-8.4	1.97	0.39
Sub_14	2.6	8.94	0.59	25	9.1	0.68	-31.5	1.06	0.3	-11.4	1.85	0.4
Sub_15	2.6	8.03	0.67	14.9	8.08	0.74	-25.8	0.91	0.41	9.8	1.65	0.54
Sub_16	-14.2	5.49	0.81	-4.1	6.04	0.82	-33.6	0.42	0.73	-33.3	0.78	0.75
Sub_17	-21.5	5.82	0.8	-15.3	7.28	0.76	-50.8	0.6	0.7	-52.3	0.84	0.83
Sub_18	-15.6	4.23	0.87	-4.8	5.04	0.85	-43	0.4	0.77	-50.7	0.52	0.8
Sub_19	-24.5	6.08	0.84	-20.1	8.07	0.77	-47.1	0.76	0.8	-53.1	0.66	0.87
Sub_20	-16.6	3.53	0.93	-10.8	4.59	0.89	-40.9	0.52	0.92	-46.8	0.34	0.92
Sub_21	-32.1	4.59	0.86	-21.6	6.25	0.78	-68.8	0.73	0.85	-72.7	0.49	0.78
Sub_22	-13.8	2.68	0.97	-12	3.6	0.96	-21	0.44	1	-27.7	0.2	0.99
Sub_23	-29.2	3.13	0.97	-26.3	3.84	0.93	-41.3	0.39	0.97	-56.8	0.25	0.92
Sub_24	-18	2.14	0.99	-14.5	2.28	0.97	-19	0.19	0.94	-41	0.13	0.94
Promedio	-14.07	9.23	0.57	-3.94	8.39	0.66	-24.83	1.15	0.52	-17.45	2.00	0.52
PBIAS	-15.07											
RMSE	5.19											
CC	0.57											

Anexo 13. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto IMERGDF.

Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]
Sub_1	-56.4	12.86	0.23	-43	10.82	0.33	47	2.39	0.12	28.6	3.13	0.3
Sub_2	-58.4	12.7	0.27	-46.7	11.37	0.33	78.9	2.75	0.11	30.4	3.57	0.31
Sub_3	-60.6	12.88	0.29	-52.4	12.1	0.33	99.3	3.13	0.1	23.3	3.88	0.31
Sub_4	-52.2	12.08	0.24	-40.4	9.68	0.35	50.5	2.67	0.15	7.2	5.38	0.24
Sub_5	-59.1	14.92	0.2	-47.2	12.48	0.33	76.8	2.71	0.07	4.2	3.79	0.26
Sub_6	-58.7	14.63	0.19	-45.9	11.93	0.33	62.3	2.52	0.1	9.9	3.43	0.28
Sub_7	-58.1	13.5	0.22	-40.7	11.09	0.3	23.4	2.48	0.09	18.5	2.89	0.26
Sub_8	-54	12.6	0.24	-41.1	10.17	0.36	40.6	2.41	0.12	20.4	3.05	0.33
Sub_9	-52.6	13.58	0.21	-41.4	11.37	0.35	85.9	2.59	0.09	29.9	3.48	0.27
Sub_10	-54.5	12.4	0.27	-38.9	10.17	0.34	24	2.38	0.13	17.6	2.85	0.3
Sub_11	-51.3	9.42	0.36	-31.4	9.52	0.38	36.1	1.85	0.19	16.3	2.39	0.33
Sub_12	-51.7	10.05	0.33	-37.3	9.49	0.37	-0.4	2.68	0.1	6.8	2.74	0.3
Sub_13	-48.6	9.34	0.36	-33.2	9.63	0.4	34.9	2.09	0.16	19	2.46	0.32
Sub_14	-47.9	9.44	0.35	-30.3	9.65	0.39	41.1	1.93	0.17	21.6	2.43	0.32
Sub_15	-44.8	9.59	0.38	-34.9	10.52	0.4	54.4	1.8	0.19	46	2.37	0.25
Sub_16	-41.4	9.69	0.38	-31	9.97	0.44	70.4	1.13	0.23	87.2	1.78	0.19
Sub_17	-44.9	10.68	0.3	-42.6	11.55	0.35	49.9	1.27	0.13	61.3	1.68	0.14
Sub_18	-38.1	8.88	0.42	-24	9.07	0.46	62.6	1.04	0.25	88.5	1.49	0.23
Sub_19	-43.2	11.19	0.31	-41.6	12.53	0.35	43.8	1.32	0.11	92.2	1.37	0.11
Sub_20	-36.8	9.27	0.41	-28.1	9.98	0.43	46.6	1.25	0.19	110.8	1.17	0.19
Sub_21	-42.5	9.69	0.3	-40.9	10.6	0.32	-9.6	1.12	0.11	35.5	0.99	0.19
Sub_22	-39.1	10.16	0.37	-35.1	11.75	0.35	-7.2	1.7	0.06	142.1	1.02	0.11
Sub_23	-39.5	8.96	0.38	-31.2	9.76	0.4	-17.3	1.13	0.09	70.8	0.76	0.18
Sub_24	-28.3	8.82	0.37	-6.5	9.08	0.4	43.7	0.7	0.25	150.6	0.78	0.25
Promedio	-48.45	11.14	0.31	-36.91	10.60	0.37	43.24	1.96	0.14	47.45	2.45	0.25
PBIAS	1.33											
RMSE	6.54											
CC	0.27											

Anexo 14. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto TRMM - 3B42V7.

Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]
Sub_1	-52.6	13.02	0.23	-36.7	11.29	0.32	34.5	2.86	0.1	39.2	3.71	0.25
Sub_2	-54	13.01	0.24	-41.4	11.74	0.31	69.9	2.94	0.13	38.8	3.91	0.26
Sub_3	-57.9	13.13	0.25	-52.1	12.58	0.28	82.1	3.14	0.1	25.1	4.03	0.25
Sub_4	-53.3	12.19	0.27	-43.3	10.23	0.32	27	2.91	0.08	0	5.77	0.12
Sub_5	-57.1	14.77	0.21	-47.9	12.49	0.3	52.5	2.81	0.09	0.9	3.74	0.27
Sub_6	-55.3	14.34	0.22	-42.1	11.8	0.32	46.5	2.74	0.11	17.8	3.55	0.27
Sub_7	-50.7	13.67	0.22	-33.6	11.7	0.28	21.4	3.03	0.07	58.2	3.72	0.22
Sub_8	-51.9	12.42	0.27	-41.7	10.35	0.33	26.2	2.68	0.1	24.3	3.33	0.26
Sub_9	-50.4	13.34	0.24	-43	11.48	0.31	60.5	2.68	0.13	25.5	3.45	0.28
Sub_10	-51.7	12.3	0.29	-41	10.54	0.3	16.8	2.72	0.09	34.2	3.24	0.23
Sub_11	-48.1	9.61	0.38	-35.9	9.32	0.41	15.5	2.13	0.11	22.4	2.91	0.18
Sub_12	-52.3	10.1	0.37	-42.5	9.93	0.37	-16.5	2.71	0.08	10.3	3.18	0.17
Sub_13	-48.4	9.2	0.41	-39.1	9.47	0.43	13.3	2.15	0.11	25	2.96	0.16
Sub_14	-46.9	9.24	0.4	-36.6	9.3	0.42	24.3	2.1	0.12	33.7	2.89	0.17
Sub_15	-48.4	9.13	0.44	-41.1	10.08	0.46	13.9	1.66	0.15	32.8	2.53	0.16
Sub_16	-45.5	9.71	0.38	-34.8	10.05	0.46	-3.9	1.09	0.11	32.4	1.59	0.24
Sub_17	-50.7	11.22	0.27	-44.3	12.31	0.29	-28.9	1.09	0.06	9.4	1.62	0.11
Sub_18	-40	9.24	0.37	-26.9	9.49	0.45	-1.7	1.1	0.08	49.8	1.37	0.32
Sub_19	-51.1	11.46	0.29	-43.3	12.8	0.33	-47.4	1.16	0.04	22.3	1.1	0.24
Sub_20	-42.5	9.62	0.35	-29.3	10.11	0.44	-32.4	1.14	0.07	42.7	0.92	0.37
Sub_21	-51.3	10.37	0.25	-42.3	11.18	0.26	-56.9	1.04	0.04	-12.3	0.85	0.13
Sub_22	-40.9	10.5	0.32	-29.9	11.33	0.41	-41.5	1.68	0.06	97.5	0.89	0.35
Sub_23	-48.9	9.51	0.32	-34.6	9.82	0.41	-50.2	1.1	0.1	19.1	0.62	0.32
Sub_24	-33	9.65	0.3	-8.1	9.49	0.39	-15.2	0.66	0.17	93	0.7	0.38
promedio	-49.29	11.28	0.30	-37.98	10.79	0.36	8.74	2.06	0.10	30.92	2.61	0.24
PBIAS	-11.90											
RMSE	6.68											
CC	0.25											

Anexo 15. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto CMORPH.

Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]
Sub_1	-66.4	12.69	0.24	-59.9	11.06	0.25	-17.8	1.82	0.12	-28.2	2.74	0.17
Sub_2	-68.4	12.73	0.26	-62.7	11.89	0.25	-14.8	1.84	0.11	-38	3.14	0.17
Sub_3	-70.4	13.31	0.27	-65	13.19	0.24	-40.4	1.83	0.12	-64.3	3.51	0.15
Sub_4	-65.7	13.01	0.2	-55.9	11.64	0.22	-60.1	1.82	0.09	-75	5.38	0.08
Sub_5	-67.4	14.83	0.24	-59.4	13.6	0.21	-36.1	1.82	0.08	-65.7	3.38	0.11
Sub_6	-67.3	14.18	0.25	-59.7	12.49	0.23	-22.9	1.8	0.1	-47.8	3.04	0.15
Sub_7	-65	13.45	0.2	-57.8	11.16	0.25	-26.3	2.01	0.11	-19	2.6	0.16
Sub_8	-63.7	12.89	0.23	-55.6	11.19	0.26	-44.1	1.63	0.14	-54.9	2.69	0.14
Sub_9	-62.1	13.62	0.24	-54.8	12.49	0.23	-34.7	1.61	0.11	-59.2	2.9	0.11
Sub_10	-63.5	12.89	0.23	-54.4	11.3	0.25	-50	1.65	0.14	-53.3	2.41	0.14
Sub_11	-50.4	10.32	0.28	-34.1	11.53	0.27	-34.1	1.24	0.16	-33.9	2.2	0.15
Sub_12	-58.5	10.97	0.26	-46.4	11.42	0.27	-62.2	2.03	0.11	-55.8	2.54	0.13
Sub_13	-50.7	10.06	0.29	-37.4	11.69	0.28	-35.3	1.31	0.13	-32.5	2.24	0.15
Sub_14	-49.3	9.99	0.29	-34.8	11.52	0.28	-29	1.21	0.15	-27.8	2.13	0.15
Sub_15	-48.9	10.58	0.3	-38.8	13.12	0.26	-39	1.07	0.1	-33.5	2.07	0.13
Sub_16	-42.8	9.84	0.36	-28.9	12.29	0.31	7.6	0.86	0.09	26.7	1.81	0.1
Sub_17	-53.6	9.42	0.43	-37.7	13.17	0.3	-29.4	0.92	0.04	-7	2	0.06
Sub_18	-40.8	8.95	0.37	-19.7	11	0.33	37.5	0.97	0.06	88.9	1.94	0.13
Sub_19	-47.2	10.23	0.43	-26.5	14.38	0.28	5.7	1.24	0.01	92.4	2.34	0.04
Sub_20	-36.9	9.4	0.36	-13.2	12.16	0.3	48.1	1.27	0.01	194.4	2.12	0.1
Sub_21	-47.4	8.74	0.41	-23.1	12.21	0.31	-25.3	1.13	0	36.1	2.14	0.07
Sub_22	-32.7	10.28	0.35	-8.9	13.73	0.28	23.4	1.77	0	291	2.18	0.06
Sub_23	-29.4	9.31	0.34	-2.2	12	0.29	55.1	1.33	0	292.8	2.09	0.11
Sub_24	-19.5	9.81	0.22	12.7	11.02	0.22	188.9	1.13	0.01	566.5	2.12	0.2
Promedio	-52.83	11.31	0.29	-38.51	12.14	0.27	-9.80	1.47	0.08	37.20	2.57	0.12
PBIAS	-15.98											
RMSE	6.87											
CC	0.19											

Anexo 16. Valores obtenidos de la evaluación por subcuencas por estaciones del año – producto CHIRPS.

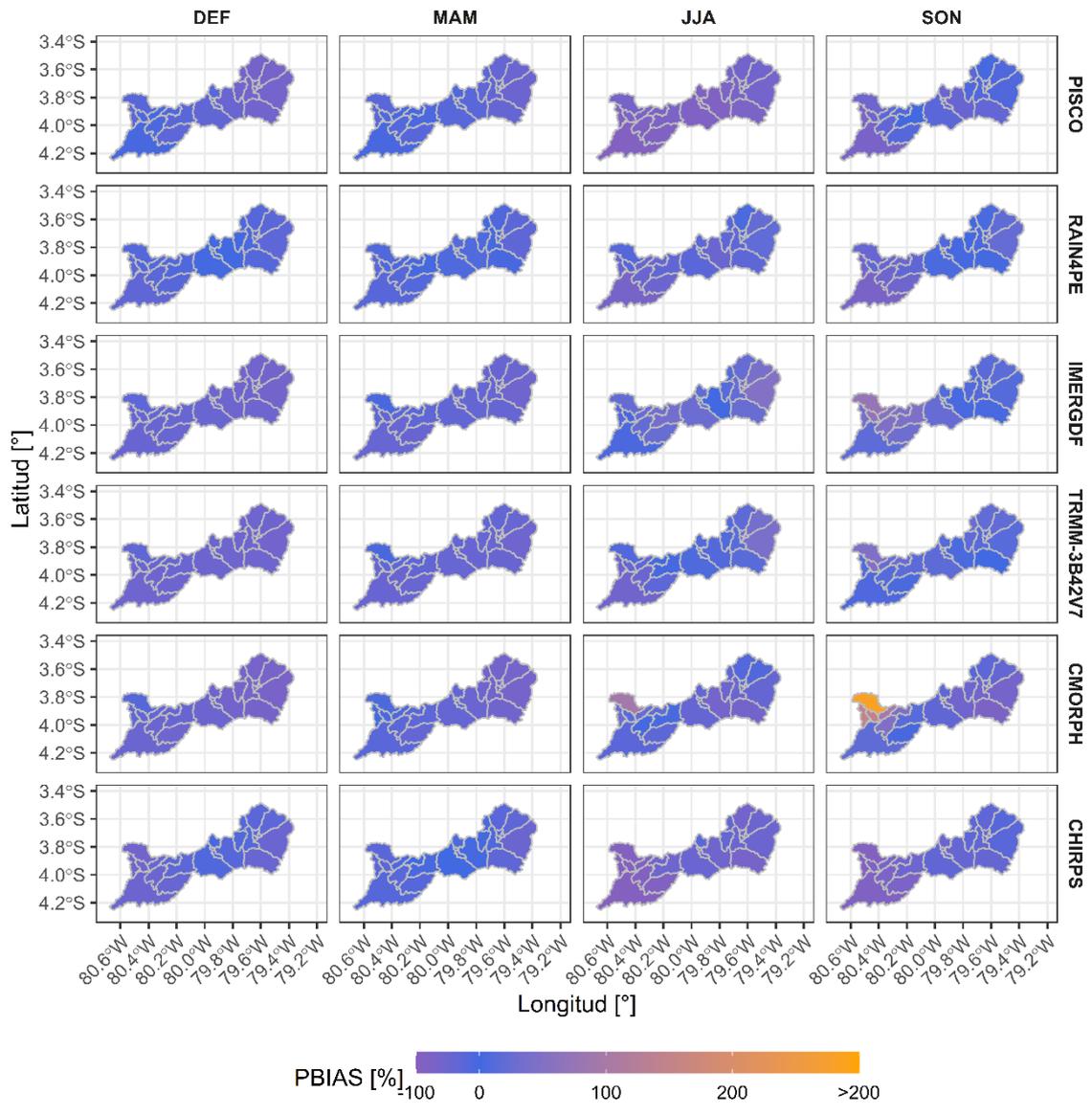
Subcuencas	DEF			MAM			JJA			SON		
	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]	PBIAS [%]	RMSE [-]	CC [-]
Sub_1	-25.3	16.91	0.14	-23.9	14.49	0.22	-59.7	1.57	0.14	-30.5	2.9	0.09
Sub_2	-29.2	18.04	0.09	-30.7	15.61	0.21	-49.2	1.64	0.14	-19.7	3.63	0.07
Sub_3	-45.6	16.03	0.12	-47.5	14.33	0.22	-49.6	1.81	0.1	-23.4	4.07	0.05
Sub_4	-44.3	14.39	0.14	-31.3	12.77	0.21	-68.2	1.8	0.06	-40.4	5.57	0.03
Sub_5	-23.5	19.18	0.12	-19.6	16.78	0.21	-32.5	1.83	0.16	-43.2	3.61	0.08
Sub_6	-19.3	19.84	0.11	-16.6	16.28	0.22	-49	1.67	0.16	-42.9	3.23	0.08
Sub_7	-16.9	19.2	0.13	-9.5	16.15	0.2	-36.4	2.09	0.08	-27.9	2.8	0.05
Sub_8	-16.9	16.99	0.15	-12	15.01	0.22	-48.1	1.69	0.12	-34.9	2.96	0.07
Sub_9	-10.3	18.83	0.12	-9.4	16.78	0.2	-24.9	1.74	0.14	-30.4	3.21	0.07
Sub_10	-15.5	17.75	0.14	-4.7	16.46	0.2	-37.7	1.95	0.1	-29.7	2.8	0.05
Sub_11	-7	18.41	0.18	11.4	16.44	0.25	-24.9	1.68	0.13	-43.4	2.17	0.03
Sub_12	-20.2	15.47	0.2	-2.7	15.34	0.24	-55.6	2.32	0.05	-40.3	2.64	0.06
Sub_13	-14.2	16.33	0.2	5.4	15.59	0.29	-45.8	1.5	0.13	-44.1	2.15	0.03
Sub_14	-13	17.47	0.18	9.1	16.07	0.28	-46.8	1.38	0.15	-47.5	2.02	0.02
Sub_15	-14.1	14.86	0.19	0.2	14.58	0.32	-46.3	1.1	0.18	-33.8	1.98	0.03
Sub_16	-29.2	12.52	0.19	-6.3	13.56	0.3	-52.3	0.66	0.29	-53.8	1.25	0.02
Sub_17	-41.6	12.24	0.17	-18.6	12.96	0.35	-86.6	0.81	0.1	-73.4	1.28	0.01
Sub_18	-27.9	11.47	0.23	0	12.78	0.31	-57.3	0.73	0.18	-56.4	0.93	0.01
Sub_19	-48	12.28	0.2	-21.7	13.81	0.3	-88.9	1.08	0.05	-74	0.99	0
Sub_20	-40	10.89	0.23	-9	12.31	0.31	-83.3	1	0.03	-65.6	0.71	0.01
Sub_21	-48.6	10.1	0.22	-20.3	11.36	0.32	-94.6	1.01	0.02	-83.5	0.7	0.02
Sub_22	-53.6	11.08	0.21	-27.3	12.55	0.28	-91.7	1.61	0.01	-79.4	0.63	0.02
Sub_23	-55.6	9.99	0.21	-25.5	10.98	0.28	-90.4	1.08	0.02	-87.4	0.48	0.01
Sub_24	-56.6	9.74	0.17	-26.1	9.71	0.25	-90.6	0.54	0.04	-90.1	0.31	0
Promedio	-29.85	15.00	0.17	-14.03	14.28	0.26	-58.77	1.43	0.11	-49.82	2.21	0.04
PBIAS	-38.12											
RMSE	8.23											
CC	0.14											

Anexo 17: Topología de acumulación de caudales en la cuenca Puyango – Tumbes, para el modelo hidrológico GR4J.

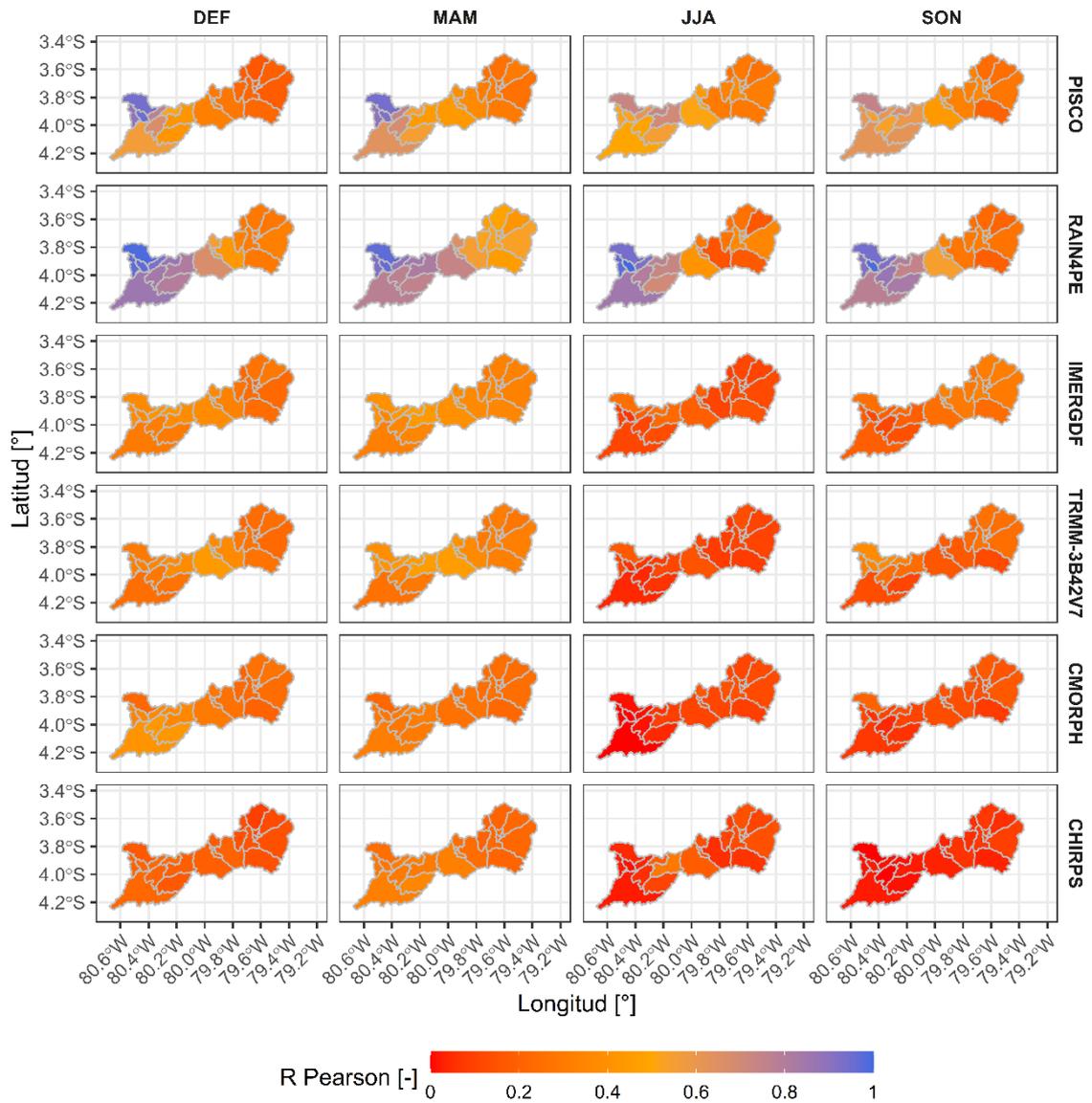
Subcuencas	Topología	Estaciones de calibración
Sub_1	$Q1 = q1$	PCM
Sub_2	$Q2 = q2$	PCM
Sub_3*	$Q3 = q3$	PAA
Sub_4	$Q4 = q4$	PCM
Sub_5	$Q5 = Q2 + q5$	PCM
Sub_6	$Q6 = Q1 + q6$	PCM
Sub_7	$Q7 = q7$	PCM
Sub_8	$Q8 = Q9 + Q3 + q8$	PCM
Sub_9	$Q9 = Q6 + Q5 + q9$	PCM
Sub_10	$Q10 = Q7 + q10$	PCM
Sub_11	$Q11 = q11$	PCM
Sub_12	$Q12 = Q10 + Q8 + Q4 + q12$	PCM
Sub_13	$Q13 = Q12 + q13$	PCM
Sub_14	$Q14 = Q11 + q14$	PCM
Sub_15*	$Q15 = Q12 + Q14 + q15$	PCM
Sub_16	$Q16 = Q15 + Q18 + q16$	ETI
Sub_17	$Q17 = q17$	ETI
Sub_18	$Q18 = q18$	ETI
Sub_19	$Q19 = Q16 + Q17 + q19$	ETI
Sub_20	$Q20 = q20$	ETI
Sub_21	$Q21 = q21$	ETI
Sub_22	$Q22 = Q19 + Q21 + Q20 + q22$	ETI
Sub_23	$Q23 = q23$	ETI
Sub_24*	$Q24 = Q23 + Q22 + q24$	ETI

Nota: Q_i hace referencia al caudal total acumulado por las subcuencas, q_i es el caudal generado por la subcuenca número i ; PCM: Puyango CPTO. Militar, PAA: Pindo AJ Amarillo, ETI: El Tigre. (*) Subcuencas en las que las estaciones para la calibración están alojadas.

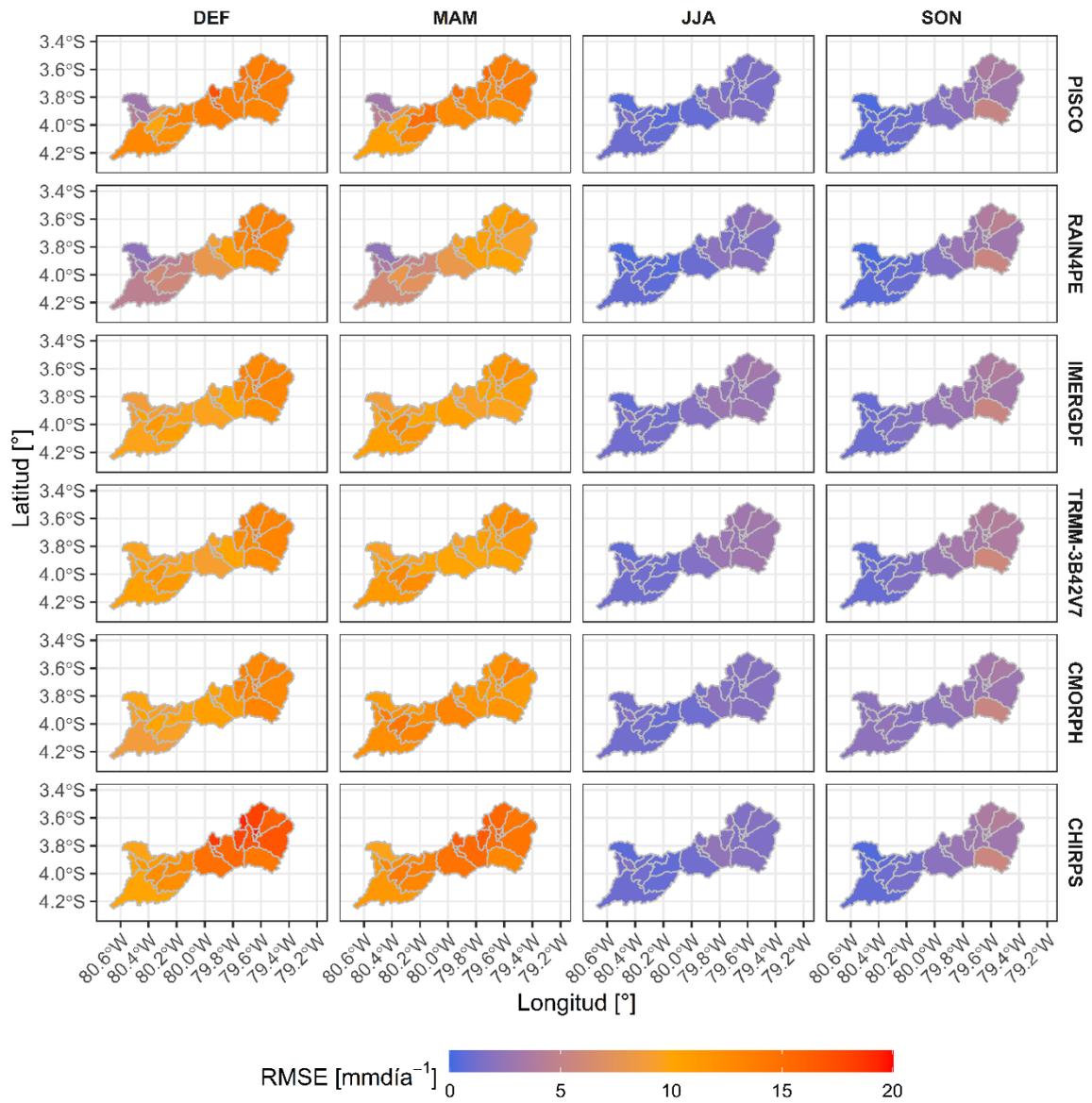
Anexo 18. Distribución espacial del porcentaje del sesgo (PBIAS %) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.



Anexo 19. Distribución espacial del coeficiente de correlación de Pearson (CC) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.



Anexo 20. Distribución espacial del error medio cuadrático (RMSE) en las subcuencas de la Cuenca Puyango – Tumbes.



Anexo 21. Valores de la evaluación del sesgo en sectores de calibración por épocas del año

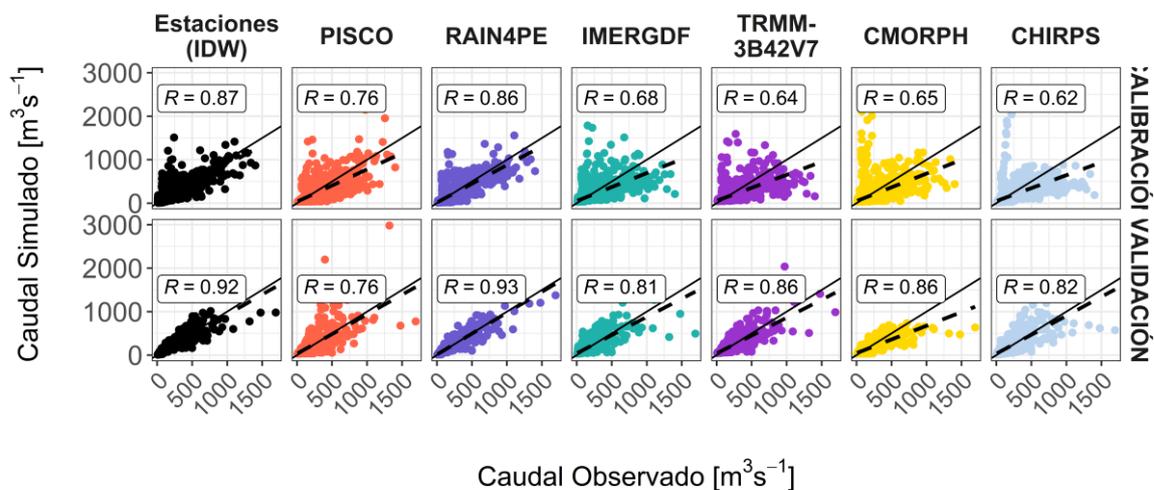
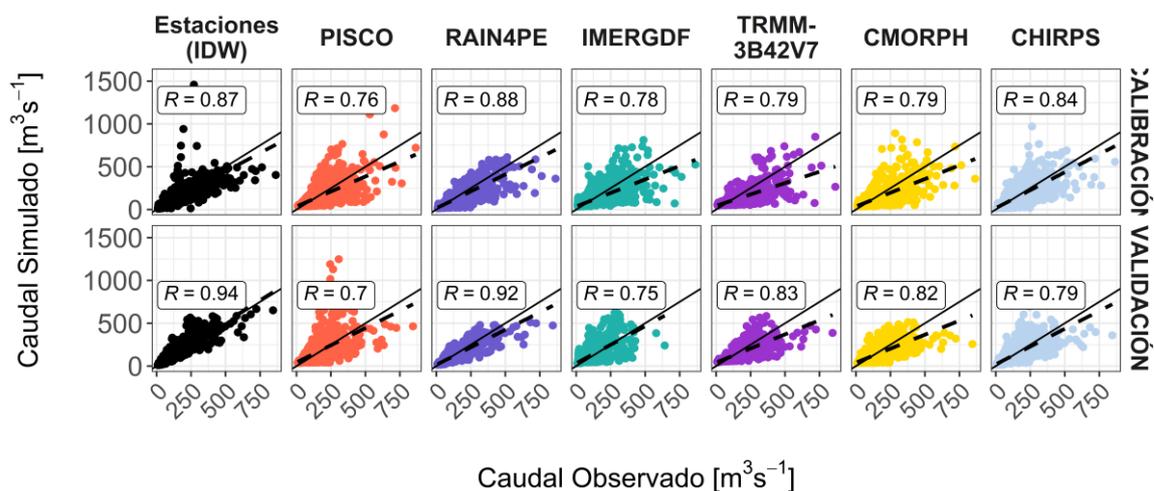
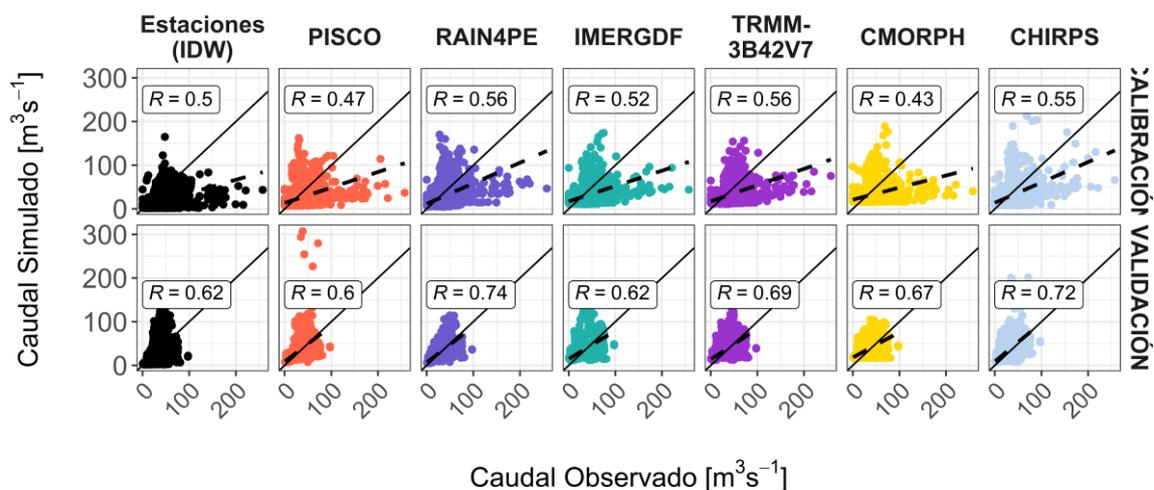
PERIODO	PPES	SECTOR 1			SECTOR 2			SECTOR 3		
		PBIAS	RMSE	CC	PBIAS	RMSE	CC	PBIAS	RMSE	CC
VERANO (DEF)	PISCOpd	-62.2	14.08	0.19	-62.2	14.08	0.19	-15.7	7.79	0.71
	RAIN4PE	-28.6	13.64	0.27	-28.6	13.64	0.27	-23.4	3.91	0.9
	IMERGDF	-60.2	12.75	0.29	-60.2	12.75	0.29	-40.8	8.98	0.37
	TRMM_3B42	-57.9	13	0.26	-57.9	13	0.26	-47.8	9.38	0.34
	CMORPH	-69.9	13.28	0.27	-69.9	13.28	0.27	-44.7	8.6	0.42
	CHIRPS	-44.6	15.95	0.12	-44.6	15.95	0.12	-44.6	9.99	0.24
OTOÑO (MAM)	PISCOpd	-48	13.11	0.19	-30	10.33	0.43	-12.4	7.93	0.74
	RAIN4PE	-29.6	11.48	0.27	3.3	8.25	0.62	-15.8	4.99	0.86
	IMERGDF	-51.8	11.94	0.29	-39.7	8.78	0.44	-35	9.54	0.42
	TRMM_3B42	-51	12.31	0.26	-39.7	8.9	0.42	-35.7	9.92	0.4
	CMORPH	-64.3	12.94	0.27	-50.5	10.3	0.29	-22.6	11.49	0.33
	CHIRPS	-46.1	14.1	0.12	-11.8	12.66	0.29	-17.6	10.92	0.35
INVIERNO (JJA)	PISCOpd	-62.1	1.56	0.26	-74.1	1.18	0.39	-82.1	0.74	0.61
	RAIN4PE	41.2	2.39	0.16	-20.1	1.36	0.29	-49.6	0.48	0.9
	IMERGDF	102.7	3.12	0.1	38.9	2.08	0.17	28	1	0.17
	TRMM_3B42	85.2	3.13	0.1	20.1	2.29	0.12	-36.4	0.93	0.08
	CMORPH	-39.4	1.8	0.12	-43.3	1.44	0.13	10.2	1.01	0.02
	CHIRPS	-48.8	1.78	0.1	-52.8	1.47	0.12	-83.9	0.82	0.12
PRIMAVERA (SON)	PISCOpd	-12.6	3.55	0.25	-12.6	3.55	0.25	-37.3	0.56	0.69
	RAIN4PE	46.7	4.44	0.21	46.7	4.44	0.21	-53.8	0.47	0.86
	IMERGDF	25.3	3.84	0.32	25.3	3.84	0.32	72.8	1.12	0.2
	TRMM_3B42	27.2	3.98	0.25	27.2	3.98	0.25	19.7	0.97	0.25
	CMORPH	-63.7	3.45	0.15	-63.7	3.45	0.15	81.3	1.96	0.09
	CHIRPS	-22.1	4.02	0.05	-22.1	4.02	0.05	-73.1	0.78	0.03

Nota: Valores de PBIAS están en (%), y los valores de RMSE están en (mm).

Anexo 22. Métricas de desempeño para la calibración y validación en las estaciones de aforo (sectores de calibración), del modelo GR4J.

Estación de aforo	Métricas estadísticas	Productos de precipitación estimada por satélite (PPES)							
		Estaciones (IDW)	PISCO	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS	
PINDO AJ AMARRILLO (PAA)	CALIBRACIÓN	logNSE	0.39	0.54	0.68	0.08	0.13	-0.14	0.44
		KGE	0.54	0.41	0.68	0.37	0.47	0.36	0.49
		NSE	-0.02	-0.27	0.39	-0.03	0.16	0.1	0.11
		MAE	10.06	10.39	8.48	13.06	12.53	14.64	10.78
		RMSE	18.49	20.64	14.33	18.21	16.77	17.36	17.29
		CC	0.62	0.6	0.74	0.62	0.69	0.67	0.72
		PBIAS (%)	-10	27	16.7	50	43.3	53	35.3
	VALIDACIÓN	logNSE	-0.02	0.26	0.32	0.12	0.13	0	0.24
		KGE	0.21	0.4	0.52	0.42	0.44	0.32	0.52
		NSE	0.07	0.14	0.23	0.25	0.31	0.13	0.21
		MAE	14.64	15.04	13.91	16	15.73	18.6	15.17
		RMSE	27.79	26.8	25.42	25.01	24.06	26.87	25.76
		CC	0.5	0.47	0.56	0.52	0.56	0.43	0.55
		PBIAS (%)	-46.4	-11.7	-8	2.7	4.8	10.6	1
PUYANGO EN CPTO. MILITAR (PCM)	CALIBRACIÓN	logNSE	0.94	0.33	0.9	0.42	0.32	0.47	0.84
		KGE	0.85	0.49	0.86	0.51	0.66	0.66	0.76
		NSE	0.85	0.19	0.85	0.3	0.66	0.65	0.54
		MAE	15.97	48.77	17.96	38.56	38.29	36.12	28.57
		RMSE	35.45	82.72	35.52	59.87	53.55	54.46	62.46
		CC	0.94	0.7	0.92	0.75	0.83	0.82	0.79
		PBIAS (%)	10.9	38.5	1.9	39.7	21.3	19.8	10.6
	VALIDACIÓN	logNSE	0.9	0.47	0.84	0.45	0.35	0.48	0.84
		KGE	0.87	0.72	0.84	0.7	0.61	0.71	0.83
		NSE	0.74	0.54	0.77	0.6	0.6	0.62	0.67
		MAE	20.4	44.15	24.22	39.94	42.34	38.66	27.63
		RMSE	50.95	67.72	47.55	63.31	62.78	61.38	57.04
		CC	0.87	0.76	0.88	0.78	0.79	0.79	0.84
		PBIAS (%)	2.9	13.2	-3.2	6.4	5.5	7.4	3.8
EL TIGRE (ETI)	CALIBRACIÓN	logNSE	0.94	0.47	0.91	0.5	0.41	0.54	0.75
		KGE	0.91	0.6	0.87	0.58	0.72	0.67	0.7
		NSE	0.85	0.37	0.85	0.54	0.71	0.72	0.6
		MAE	22.02	51.9	24.41	46.47	44.5	41.39	41.75
		RMSE	52.87	108.03	52.85	84.82	73.48	72.4	86.25
		CC	0.92	0.76	0.93	0.81	0.86	0.86	0.82
		PBIAS (%)	4.4	25.3	10.3	37	24.3	13.4	23.1
	VALIDACIÓN	logNSE	0.87	0.59	0.86	0.58	0.49	0.56	0.78
		KGE	0.87	0.76	0.86	0.66	0.62	0.64	0.62
		NSE	0.75	0.54	0.72	0.39	0.33	0.32	0.26
		MAE	34.26	58.31	36.87	59.97	62.26	60.99	52.76
		RMSE	85.51	114.98	89.05	131.96	138.95	139.75	145.5
		CC	0.87	0.76	0.86	0.68	0.64	0.65	0.62
		PBIAS (%)	0.9	5.5	0.3	9.1	9.2	6.6	2.6

Anexo 23. Gráficos de dispersión del coeficiente de correlación de Pearson en los Sectores de calibración, para la evaluación del modelo hidrológico GR4J.



Anexo 24. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 1.

Firmas hidrológicas	Símbolo	Unidades	OBS	Estaciones (IDW)	PISCOpd	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
Distribución del flujo										
Caudal medio	Qm	mm/día	3.79	2.48	3.89	3.78	4.39	4.49	4.91	4.32
Curvas de duración de										
FDC Pendiente	FDC-slope	-	1.54	1.49	0.95	1.13	0.52	0.63	0.51	1.05
FDC 1% del cuantil	FDC-Q01	mm/día	19.56	14.89	17.56	16.9	17.35	16.3	16.57	18.47
FDC 5% del cuantil	FDC-Q05	mm/día	11.88	9.4	10.56	11.36	10.54	10.88	11.35	11.62
FDC 10% del cuantil	FDC-Q10	mm/día	9.26	6.71	8.35	8.9	7.96	8.16	8.85	9.41
FDC 25% del cuantil	FDC-Q25	mm/día	5.51	3.23	4.86	4.96	4.96	5.31	5.65	5.68
FDC 50% del cuantil	FDC-Q50	mm/día	1.91	1.03	2.4	2.24	3.28	3.36	3.55	2.57
FDC 75% del cuantil	FDC-Q75	mm/día	0.95	0.53	1.59	1.3	2.55	2.51	3.01	1.73
FDC 90% del cuantil	FDC-Q90	mm/día	0.62	0.4	1.34	1.04	2.21	2.22	2.88	1.55
FDC 95% del cuantil	FDC-Q95	mm/día	0.52	0.37	1.28	0.96	2.1	2.15	2.82	1.49
FDC 99% del cuantil	FDC-Q99	mm/día	0.18	0.34	1.22	0.88	1.96	2.01	2.73	1.41
Análisi de flujo base										
Índice de flujo base	BFI	-	0.7	0.82	0.8	0.8	0.84	0.86	0.91	0.85
Dinámicas del flujo										
Proporción de escorrentía	RC	-	0.9	0.6	1.82	1.09	2.02	1.86	3.36	1.76
Elasticidad del flujo	Stream-Elas	-	-0.36	1.87	0.76	1.21	0.71	0.85	0.58	0.83
Análisis del régimen de caudales, el enfoque P-Q										
Media diaria interanual acumulada, diferencia P_Q	P-Q	mm	0.38	1.68	-1.75	-0.3	-2.22	-2.08	-3.45	-1.86

Anexo 25. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 2.

Firmas hidrológicas	Símbolo	Unidades	OBS	Estaciones (IDW)	PISCOpd	RAIN4PE	IMERGD F	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
Distribución del flujo										
Caudal medio	Qm	mm/día	2.53	2.83	3.27	2.59	2.92	2.92	3.01	2.84
Curvas de duración de flujo										
FDC Pendiente	FDC-slope	-	1.58	1.62	0.75	1.25	0.61	0.47	0.74	1.47
FDC 1% del cuantil	FDC-Q01	mm/día	14.01	14.6	17.36	13.29	15.31	13.01	15.19	15.87
FDC 5% del cuantil	FDC-Q05	mm/día	9.32	10.04	9.79	9.13	8.63	7.61	8.15	9.25
FDC 10% del cuantil	FDC-Q10	mm/día	6.64	7.57	7.11	6.81	5.84	5.28	6.04	7.08
FDC 25% del cuantil	FDC-Q25	mm/día	3.27	3.95	3.52	3.28	3.05	3.06	3.41	3.81
FDC 50% del cuantil	FDC-Q50	mm/día	1.15	1.25	1.92	1.24	1.88	2.01	1.85	1.24
FDC 75% del cuantil	FDC-Q75	mm/día	0.57	0.63	1.45	0.76	1.39	1.67	1.41	0.72
FDC 90% del cuantil	FDC-Q90	mm/día	0.44	0.46	1.34	0.63	1.2	1.55	1.29	0.62
FDC 95% del cuantil	FDC-Q95	mm/día	0.39	0.42	1.29	0.58	1.15	1.51	1.23	0.59
FDC 99% del cuantil	FDC-Q99	mm/día	0.33	0.38	1.21	0.54	1.1	1.47	1.17	0.55
Análisis de flujo base										
Índice de flujo base	BFI	-	0.7	0.78	0.83	0.81	0.77	0.84	0.82	0.77
Dinámicas del flujo										
Proporción de escorrentía	RC	-	0.32	0.34	0.76	0.37	0.66	0.63	0.95	0.52
Elasticidad del flujo	Stream-Elas	-	0.98	1.24	1.03	1.41	0.73	1.06	0.72	1.08
Análisis del régimen de caudales, el enfoque P-Q										
Media diaria interanual acumulada, diferencia P_Q	P-Q	mm	1.98	1.68	-1.16	0.87	-0.62	-0.51	-1.49	-0.34

Nota: “OBS” significa valores de caudales observados obtenidos para la comparación de las mejores firmas hidrológicas.

Anexo 26. Valores obtenidos de la evaluación por firmas hidrológicas en la Cuenca Puyango Tumbes para el Sector 3.

Firmas hidrológicas	Símbolo	Unidades	OBS	Estaciones (IDW)	PISCOpd	RAIN4PE	IMERGDF	TRMM-3B42V7	CMORPH	CHIRPS
Distribución del flujo										
Caudal medio	Qm	mm/día	1.88	1.93	2.07	1.97	2.13	2.16	1.99	2.15
Curvas de duración de										
FDC Pendiente	FDC-slope	-	1.47	1.68	0.73	1.41	0.76	0.6	0.78	1.42
FDC 1% del cuantil	FDC-Q01	mm/día	14.73	13.62	15.02	13.58	12.79	12.87	11.75	12.96
FDC 5% del cuantil	FDC-Q05	mm/día	7.34	7.55	6.91	7.8	7.07	6.57	6.04	7.36
FDC 10% del cuantil	FDC-Q10	mm/día	4.98	5.17	4.47	5.4	4.86	4.37	4.1	5.45
FDC 25% del cuantil	FDC-Q25	mm/día	2.07	2.34	1.97	2.22	2.18	2.2	2.1	2.69
FDC 50% del cuantil	FDC-Q50	mm/día	0.72	0.72	1.08	0.73	1.12	1.19	1.09	0.92
FDC 75% del cuantil	FDC-Q75	mm/día	0.35	0.35	0.82	0.43	0.82	0.98	0.82	0.54
FDC 90% del cuantil	FDC-Q90	mm/día	0.26	0.26	0.74	0.35	0.7	0.92	0.74	0.46
FDC 95% del cuantil	FDC-Q95	mm/día	0.23	0.23	0.71	0.32	0.68	0.89	0.7	0.43
FDC 99% del cuantil	FDC-Q99	mm/día	0.19	0.21	0.65	0.29	0.64	0.87	0.66	0.4
Análisis de flujo base										
Índice de flujo	BFI	-	0.65	0.72	0.8	0.72	0.71	0.77	0.8	0.77
Dinámicas del flujo										
Proporción de escorrentía	RC	-	0.18	0.18	0.32	0.22	0.36	0.36	0.41	0.3
Elasticidad del flujo	Stream-Elas	-	1.4	1.55	1.3	1.57	1.02	1.19	0.79	1.24
Análisis del régimen de caudales, el enfoque P-Q										
Media diaria interanual acumulada, diferencia P_Q	P-Q	mm	2.63	2.58	0.04	1.49	0.16	0.25	-0.48	0.35

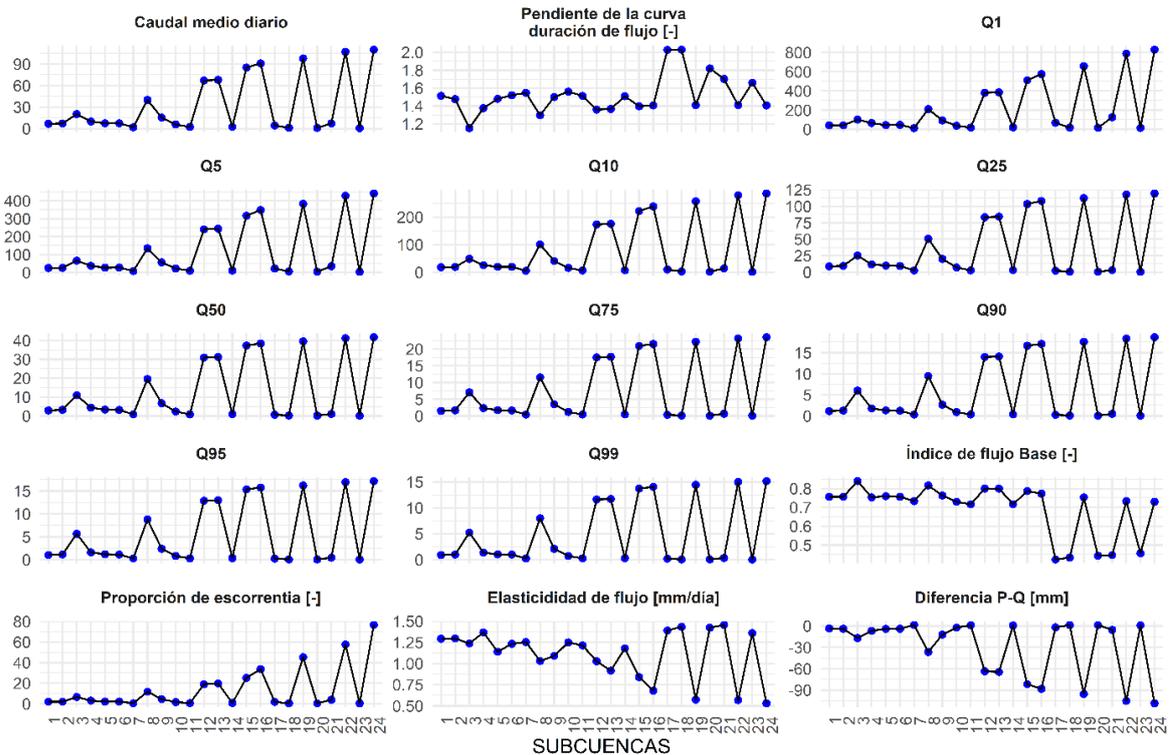
Anexo 27. Mejores productos de precipitación estimada por satélite en la evaluación de firmas hidrológicas por subcuencas.

Mejores PPES	Subcuencas	Qmean	Pendiente FDC	Q0.01	Q0.05	Q0.1	Q0.25	Q0.50	Q0.75	Q0.90	Q0.95	Q0.99	BFI	RR	Stream Eas	CurveQ	CurveP	P-Q Difference	
DW	1	8.17	1.67	42.7	29.04	21.92	11.07	3.65	1.75	1.28	1.14	1	0.77	2.14	1.24	8.17	3.81	-4.35	
	2	9.38	1.74	47.69	33.36	25.22	13.15	4.17	1.9	1.38	1.22	1.05	0.76	2.31	1.18	9.38	4.05	-5.33	
	3	14.72	1.49	83.33	57.39	40.18	18.67	6.36	3.2	2.38	2.14	1.86	0.83	3.38	1.55	14.72	4.35	-10.37	
	4	12.75	1.53	83.73	46.44	32.58	15.54	5.58	2.68	1.96	1.72	1.41	0.73	3.39	1.28	12.75	3.76	-8.99	
	5	9.71	1.74	49.38	34.48	26.1	13.65	4.32	1.98	1.43	1.27	1.09	0.76	2.54	1.12	9.71	3.83	-5.88	
	6	8.89	1.67	46.43	31.59	23.88	12.07	3.97	1.9	1.39	1.25	1.08	0.77	2.34	1.18	8.89	3.8	-5.09	
	7	2.11	1.58	11.57	7.62	5.62	2.74	0.97	0.49	0.35	0.3	0.26	0.76	0.57	1.24	2.11	3.68	1.57	
	8	37.94	1.6	196.67	135.97	102.43	51.37	16.91	8.36	6.16	5.57	4.86	0.8	10.47	0.95	37.94	3.62	-34.32	
	9	19.04	1.7	97.38	67.86	51.08	26.6	8.52	3.99	2.89	2.59	2.28	0.76	5.48	0.85	19.04	3.47	-15.56	
	10	5.93	1.59	32.58	21.58	15.75	7.57	2.66	1.35	0.98	0.87	0.75	0.75	1.65	1.22	5.93	3.6	-2.33	
	11	2.23	1.49	14.06	9.02	5.96	2.68	0.91	0.47	0.36	0.33	0.29	0.76	0.67	1.26	2.23	3.35	1.11	
	12	67.99	1.6	365.74	245.37	179.12	91.11	30.94	15.14	11.04	9.91	8.63	0.79	18.76	1.11	67.99	3.62	-64.36	
	13	68.8	1.6	370.55	248.48	181.26	92.12	31.3	15.31	11.17	10.03	8.73	0.79	19.88	0.99	68.8	3.46	-65.34	
	14	2.48	1.49	15.78	10.06	6.61	2.96	1.01	0.52	0.4	0.36	0.32	0.76	0.74	1.2	2.48	3.36	0.88	
	15	86.44	1.61	487.02	321.86	229.48	115.06	38.27	18.88	13.9	12.51	10.78	0.78	24.8	0.78	86.44	3.49	-82.96	
	16	90.46	1.61	540.42	346.23	240.35	117.38	38.43	18.94	13.94	12.55	10.81	0.77	29.29	0.6	90.46	3.09	-87.38	
	17	3.41	2.35	58.95	18.93	7.56	0.68	0.1	0.04	0.02	0.02	0.01	0.3	1.11	1.77	3.41	3.06	-0.35	
	18	0.82	2.18	13.93	4.48	1.67	0.15	0.02	0.01	0.01	0	0	0.33	0.3	1.91	0.82	2.78	1.95	
	19	95.78	1.62	617.94	374.46	253.7	119.49	38.67	19.01	13.99	12.59	10.84	0.74	34.95	0.6	95.78	2.74	-93.04	
	20	0.74	1.98	14.28	3.7	1.22	0.1	0.02	0.01	0	0	0	0.3	0.29	1.87	0.74	2.52	1.78	
	21	5.66	1.94	107.39	27.59	9.33	0.77	0.15	0.06	0.04	0.03	0.02	0.31	2.3	1.94	5.66	2.46	-3.2	
	22	102.79	1.64	722.82	409.13	270.91	123.01	39.06	19.13	14.07	12.67	10.9	0.71	42.69	0.51	102.79	2.41	-100.38	
	23	0.7	1.9	14.42	3.32	0.9	0.08	0.02	0.01	0	0	0	0.31	0.31	1.76	0.7	2.24	1.54	
	24	105.33	1.64	769.86	422.83	276.09	123.73	39.14	19.18	14.1	12.7	10.92	0.71	53.34	0.5	105.33	1.97	-103.36	
RAIN4PE	1	5.46	1.27	28.53	19.52	14.45	6.89	2.61	1.5	1.13	1.03	0.87	0.81	1.68	1.49	5.46	3.25	-2.21	
	2	5.32	1.14	25.6	17.74	13.4	6.68	2.64	1.69	1.3	1.18	0.96	0.82	1.66	1.52	5.32	3.19	-2.12	
	3	20.7	0.96	96.66	66.6	48.45	24.76	11.77	7.91	6.83	6.41	5.94	0.84	6.16	1.32	20.7	3.36	-17.34	
	4	9.16	1.27	51.6	33.92	23.93	10.77	4.39	2.51	1.95	1.73	1.5	0.79	2.73	1.48	9.16	3.36	-5.8	
	5	5.55	1.15	26.77	18.56	14.05	6.97	2.95	1.75	1.35	1.22	1	0.82	1.62	1.28	5.55	3.43	-2.11	
	6	5.99	1.28	31.27	21.44	15.89	7.55	2.86	1.64	1.23	1.13	0.95	0.81	1.73	1.38	5.99	3.46	-2.53	
	7	1.77	1.4	10.31	6.9	5	2.13	0.74	0.41	0.31	0.28	0.24	0.77	0.49	1.38	1.77	3.59	1.82	
	8	36.11	1.07	168.85	119.23	90.16	44.38	19.51	12.42	10.27	9.53	8.61	0.85	10.25	1.26	36.11	3.52	-32.58	
	9	11.9	1.22	59.88	41.27	30.88	15.05	5.98	3.49	2.68	2.43	2.01	0.82	3.47	1.35	11.9	3.43	-8.47	
	10	5.37	1.42	32.36	21.08	15.18	6.43	2.21	1.2	0.93	0.83	0.71	0.76	1.42	1.37	5.37	3.78	-1.58	
	11	2.28	1.4	15.58	9.87	6.53	2.48	0.83	0.46	0.36	0.32	0.27	0.75	0.63	1.28	2.28	3.6	1.32	
	12	61.77	1.18	313.37	220.66	161.53	74.71	30.54	16.69	15	13.75	12.27	0.83	15.98	1.05	61.77	3.87	-57.9	
	13	62.6	1.19	318.08	223.92	163.91	75.82	30.8	16.86	15.14	13.88	12.38	0.83	16.76	0.96	62.6	3.73	-58.87	
	14	2.53	1.4	17.32	11.03	7.25	2.75	0.92	0.51	0.4	0.36	0.3	0.75	0.69	1.28	2.53	3.67	1.14	
	15	79.12	1.23	423.66	294.96	210.69	93.82	36.88	22.34	17.86	16.38	14.45	0.82	21.77	0.93	79.12	3.63	-75.49	
	16	85.15	1.26	489.97	332.8	231.86	99.27	37.31	22.48	17.93	16.45	14.53	0.79	31.15	0.75	85.15	2.73	-82.42	
	17	4.68	2.56	81.21	26.11	10.62	1.54	0.16	0.06	0.04	0.04	0.03	0.25	1.87	1.28	4.68	2.5	-2.18	
	18	1.3	2.67	21.92	7.29	2.95	0.44	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.26	0.53	1.29	1.3	2.45	1.15	
	19	92.27	1.28	574.22	374.28	256.22	103.76	37.71	22.62	18.02	16.53	14.59	0.76	41.62	0.49	92.27	2.22	-90.05	
	20	1.11	2.41	20.08	6.15	2.31	0.32	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.27	0.5	1.27	1.11	2.19	1.08	
	21	7.85	2.18	152.37	42.65	14.35	1.63	0.25	0.1	0.07	0.06	0.03	0.27	4.16	1.26	7.85	1.89	-5.96	
	22	102.15	1.3	724.57	428.44	282.82	107.57	38.1	22.8	18.14	16.63	14.65	0.72	48.97	0.47	102.15	2.09	-100.06	
	23	0.93	2.12	18.11	4.61	1.56	0.21	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.26	0.55	1.24	0.93	1.69	0.77	
	24	105.69	1.3	768.21	442.7	291.64	109.05	38.29	22.88	18.2	16.68	14.69	0.71	62.33	0.41	105.69	1.7	-103.99	
CHIRPS	1	7.06	1.6	54.66	27.51	18.31	7.96	2.5	1.3	1.01	0.93	0.85	0.69	2.32	1.15	7.06	3.05	-4.01	
	2	7.34	1.55	54.21	27.72	19.07	8.58	2.78	1.47	1.16	1.07	0.96	0.69	2.41	1.19	7.34	3.04	-4.3	
	3	25.76	1.01	124.66	75.1	56.96	32.14	14.9	10.05	8.84	8.41	7.87	0.85	10.2	0.84	25.76	2.53	-23.24	
	4	8.08	1.33	60.11	31.32	20.32	8.97	3.21	1.84	1.47	1.36	1.22	0.74	3.36	1.34	8.08	2.4	-5.67	
	5	7.63	1.55	56.51	28.86	19.83	8.95	2.9	1.52	1.2	1.11	0.99	0.7	2.37	1.02	7.63	3.23	-4.41	
	6	7.74	1.61	60.17	30.23	20.09	8.76	2.73	1.42	1.1	1.02	0.92	0.69	2.33	1.14	7.74	3.33	-4.41	
	7	2.22	1.66	17.32	9.07	5.8	2.5	0.76	0.37	0.29	0.27	0.24	0.67	0.66	1.14	2.22	3.34	1.12	
	8	45.72	1.22	269.21	151.08	109.59	56.14	22.19	13.87	11.93	11.32	10.49	0.8	14.35	0.88	45.72	3.19	-42.54	
	9	15.84	1.58	119.69	60.62	41.19	18.34	5.79	3.04	2.39	2.21	2	0.71	4.86	1.07	15.84	3.26	-12.58	
	10	6.28	1.67	48.15	25.48	16.43	7.15	2.13	1.07	0.83	0.77	0.7	0.68	1.9	1.16	6.28	3.31	-2.97	
	11	2.74	1.65	25.08	11.75	7.22	2.75	0.78	0.4	0.31	0.28	0.26	0.64	0.81	1.1	2.74	3.38	0.64	
	12	71.41	1.3	460.77	255.77	178.14	84.12	31.3	18.78	15.87	14.98	13.89	0.78	22.05	0.92	71.41	3.24	-68.17	
	13	72.3	1.31	467.21	259.62	180.56	84.94	31.57	18.93	15.98	15.09	13.98	0.78	22.57	0.8	72.3	3.2	-69.09	
	14	3.03	1.64	27.78	12.89	8.01	3.03	0.86	0.44	0.34	0.31	0.29	0.64	0.96	1.06	3.03	3.16	0.14	
	15	89.55	1.35	624.24	333.23	224.4	101.38	36.75	21.7	18.18	17.16	15.85	0.76	29.07	0.81	89.55	3.08	-86.47	
	16	96.98	1.35	695.55	365.93	242.49	107.94	39.41	23.18	19.34	18.23	16.78	0.76	40.44	0.69	96.98	2.4	-94.58	
	17	5.36	1.17	63.36	21.79	12.25	4.18	1.69	0.99	0.79	0.73	0.59	0.72	2.59	1.12	5.36	2.07	-3.29	
	18	1.68	1.24	18.7	6.82	3.98	1.38	0.54	0.31	0.24	0.22	0.18	0.71	0.74	1.1	1.68	2.25	0.58	
	19	105	1.33	783.4	400.4	260.71	114.34	42.31	24.93	20.73	19.49	17.86	0.76	58.94	0.63	105	1.78	-103.22	
	20	1.26	1.07	15.31	5.01	2.81	0.95	0.41	0.25	0.2	0.18	0.14	0.76	0.69	1.13	1.26	1.82	0.56	
	21	8.98	0.99	118.97	34.78	17.79	6.33	2.86	1.82	1.42	1.22	0.96	0.76	5.58	1.17	8.98	1.61	-7.37	
	22	116.08	1.29	918.82	445.9	283.21	123.17	46.37	27.65	22.89	21.47	19.36	0.77	81.27	0.72	116.08	1.43	-114.65	
	23	0.95	0.96	11.44	3.4	1.84	0.73												

Anexo 28. Media de los valores de firmas hidrológicas extrapoladas a las subcuencas para la representación espacial.

MEDIA DE LOS MEJORES PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR SATELITE EN LA REPRESENTACIÓN DE FIRMSA HIDROLÓGICAS																	
Subcuencas	Qmean	Pendiente FDC	Q0.01	Q0.05	Q0.1	Q0.25	Q0.50	Q0.75	Q0.90	Q0.95	Q0.99	BFI	RR	Stream Elas	CurveQ	CurveP	P-Q Difference
1	6.897	1.513	41.963	25.357	18.227	8.64	2.92	1.517	1.14	1.033	0.907	0.757	2.047	1.293	6.897	3.37	-3.523
2	7.347	1.477	42.5	26.273	19.23	9.47	3.263	1.687	1.28	1.157	0.99	0.757	2.127	1.297	7.347	3.427	-3.917
3	20.393	1.153	101.55	66.363	48.863	25.197	11.01	7.053	6.017	5.653	5.223	0.84	6.58	1.237	20.393	3.413	-16.983
4	9.997	1.377	65.147	37.227	25.61	11.76	4.393	2.343	1.793	1.603	1.377	0.753	3.16	1.367	9.997	3.173	-6.82
5	7.63	1.48	44.22	27.3	19.993	9.857	3.39	1.75	1.327	1.2	1.027	0.76	2.177	1.14	7.63	3.497	-4.133
6	7.54	1.52	45.957	27.753	19.953	9.46	3.187	1.653	1.24	1.133	0.983	0.757	2.133	1.233	7.54	3.53	-4.01
7	2.033	1.547	13.067	7.863	5.473	2.457	0.823	0.423	0.317	0.283	0.247	0.733	0.573	1.253	2.033	3.537	1.503
8	39.923	1.297	211.577	135.427	100.727	50.63	19.537	11.55	9.453	8.807	7.987	0.817	11.69	1.03	39.923	3.443	-36.48
9	15.593	1.5	92.317	56.583	41.05	19.997	6.763	3.507	2.653	2.41	2.097	0.763	4.603	1.09	15.593	3.387	-12.203
10	5.86	1.56	37.697	22.713	15.787	7.05	2.333	1.207	0.913	0.823	0.72	0.73	1.657	1.25	5.86	3.563	-2.293
11	2.417	1.513	18.24	10.213	6.57	2.637	0.84	0.443	0.343	0.31	0.273	0.717	0.703	1.213	2.417	3.443	1.023
12	67.057	1.36	379.96	240.6	172.93	83.313	30.927	17.537	13.97	12.88	11.597	0.8	18.93	1.027	67.057	3.577	-63.477
13	67.9	1.367	385.28	244.007	175.243	84.293	31.223	17.7	14.097	13	11.697	0.8	19.737	0.917	67.9	3.463	-64.433
14	2.68	1.51	20.293	11.327	7.29	2.913	0.93	0.49	0.38	0.343	0.303	0.717	0.797	1.18	2.68	3.397	0.72
15	85.037	1.397	511.64	316.683	221.523	103.42	37.3	20.973	16.647	15.35	13.693	0.787	25.213	0.84	85.037	3.4	-81.64
16	90.863	1.407	575.313	348.32	238.233	108.197	38.383	21.533	17.07	15.743	14.04	0.773	33.627	0.68	90.863	2.74	-88.127
17	4.483	2.027	67.84	22.277	10.143	2.133	0.65	0.363	0.283	0.263	0.21	0.423	1.857	1.39	4.483	2.543	-1.94
18	1.267	2.03	18.183	6.197	2.867	0.657	0.203	0.113	0.087	0.077	0.063	0.433	0.523	1.433	1.267	2.493	1.227
19	97.683	1.41	658.52	383.047	256.877	112.53	39.563	22.187	17.58	16.203	14.43	0.753	45.17	0.573	97.683	2.247	-95.437
20	1.037	1.82	16.557	4.953	2.113	0.457	0.157	0.09	0.07	0.063	0.05	0.443	0.493	1.423	1.037	2.177	1.14
21	7.497	1.703	126.243	35.007	13.823	2.91	1.087	0.66	0.51	0.437	0.337	0.447	4.013	1.457	7.497	1.987	-5.51
22	107.007	1.41	788.737	427.823	278.98	117.917	41.177	23.193	18.367	16.923	14.97	0.733	57.643	0.567	107.007	1.977	-105.03
23	0.86	1.66	14.657	3.777	1.433	0.34	0.133	0.08	0.06	0.05	0.04	0.457	0.53	1.36	0.86	1.743	0.883
24	110.01	1.407	830.32	440.783	285.303	119.547	41.7	23.55	18.653	17.16	15.143	0.73	76.6	0.53	110.01	1.57	-108.44

Anexo 29. Distribución de los valores de las firmas hidrológicas evaluadas por subcuencas (producto de la extrapolación).



Anexo 30. Solicitud de datos meteorológicos de para al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Tumbes, 12 de diciembre de 2021

Oficio

Doctor

Bolívar Erazo

Director Ejecutivo

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

En su despacho. -

De mis consideraciones

Yo, **Christian Eduardo Cornejo Ruiz**, solicito de la manera más comedida, autorice a quién corresponda facilitar los datos: diarios (X) mensuales (...)

De los parámetros **PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MÍNIMA, TEMPERATURA MÁXIMA, HUMEDAD RELATIVA** de la/s estación/es: **ESTACIONES METEOROLÓGICAS**, correspondiente al sector: **Provincia:** LOJA y EL ORO, **Cantónes:** Marcabelli, Las Lajas, Balsas, Chaguarpamba, Omedo, Paltas, Salsas, Piñas, Atahualpa, Portobelo, Catamayo, Paltas, Puyango, Pindal y Zapotillo, **Parroquia:** Petenecientes a la Cuenca Puyango, Período: **1990-2019**.

Información que será aplicada en la elaboración de: /

Estudio de Investigación (x) Título. Evaluación de productos de precipitación estimada por satélite y su impacto en la hidrología de la cuenca Puyango - Tumbes.

Otros (...) Detalle Anuarios meteorológicos.

El suscrito se compromete a entregar un ejemplar del documento final sin costo al INAMHI.

Con sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,



.....
Firma

Christian Eduardo Cornejo Ruiz
Nombres y apellidos completos

Estudiante
Cargo

Universidad Nacional de Tumbes

71585064
Número de cédula

+51 938236075
Teléfono celular

120082161@untumbes.edu.pe
Correo electrónico institucional