

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECIPITACIONES MEDIAS
MENSUALES DEL SATÉLITE TRMM 3B43 Y ESTACIONES
METEOROLÓGICAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RIO
CASMA, DEPARTAMENTO DE ÁNCASH – 2021.**

Presentado por:

HUESA GRANADOS, JHONATAN LEONARDO

Asesor:

MEJIA ANAYA, TEOFANES

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

HUARAZ – PERÚ

2021



FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCENTES A
OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

1. Datos del autor:

Apellidos y Nombres: _____

Código de alumno: _____

Teléfono: _____

E-mail: _____

D.N.I. n°: _____

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Tipo de trabajo de investigación:

Tesis

Trabajo de Suficiencia Profesional

Trabajo Académico

Trabajo de Investigación

Tesinas (presentadas antes de la publicación de la Nueva Ley Universitaria 30220 – 2014)

3. Para optar el Título Profesional de:

4. Título del trabajo de investigación:

5. Facultad de: _____

6. Escuela o Carrera: _____

7. Línea de Investigación (*): _____

8. Sub-línea de Investigación (*): _____

() Según resolución de aprobación del proyecto de tesis*

9. Asesor:

Apellidos y nombres _____ D.N.I n°: _____

E-mail: _____ ID ORCID: _____

10. Referencia bibliográfica: _____

11. Tipo de acceso al Documento:

Acceso público* al contenido completo.

Acceso restringido** al contenido completo


Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:



12. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.



Firma del autor

13. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia Creative Commons, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.



El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

.....

14. Para ser verificado por la Dirección del Repositorio Institucional

Seleccione la
Fecha de Acto de sustentación:

Huaraz,

Firma:




Varillas William Eduardo
Asistente en Informática y Sistemas
- UNASAM -

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**** Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO

"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

CIUDAD UNIVERSITARIA DE SHANCAYÁN TELEFAX 043 426 588 - HUARAZ - ANCASH - PERÚ



ACTA DE CONFORMIDAD VIRTUAL DE TESIS

Los miembros del jurado, luego de evaluar el trabajo final de investigación de la Tesis titulada: ***"ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DEL SATELITE TRMM 3B43 Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RIO CASMA, DEPARTAMENTO DE ANCASH - 2021"*** presentado por el Bachiller en Ciencias de Ingeniería Agrícola ***JHONATAN LEONARDO HUESA GRANADOS***, sustentada vía la plataforma virtual Microsoft Teams el día 07 de abril del 2022, respaldada mediante **Resolución Decanatural N.º 164-2022-UNASAM-FCA**, la declaramos **CONFORME**.

Huaraz, 19 de abril de 2021.

Dr. PEDRO ALEJANDRO COLONIA CERNA

PRESIDENTE

Mag. JAVIER ALBERTO COTOS VERA

VOCAL

Dr. TITO MONER TINOCO MEYHUAY

SECRETARIO

Dr. TEOFANES MEJIA ANAYA

PATROCINADOR





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS VIRTUAL

Los miembros del Jurado de Tesis que suscriben, se reunieron a través de la plataforma virtual Microsoft Teams para escuchar y evaluar la sustentación de la Tesis presentado por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Agrícola **JHONATAN LEONARDO HUESA GRANADOS**, denominado: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DEL SATELITE TRMM 3B43 Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RIO CASMA, DEPARTAMENTO DE ANCASH - 2021"**, patrocinado por el Dr **TEOFANES MEJIA ANAYA**, Escuchada la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, la declaramos:

APROBADO

CON EL CALIFICATIVO (*)

DIECISÉIS (16)

En consecuencia, queda en condición de ser calificado APTO por el Consejo de Facultad de Ciencias Agrarias y por el Consejo Universitario de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" y recibir el Título de **INGENIERO AGRÍCOLA**, de conformidad con la Ley Universitaria y el Estatuto de la Universidad.

Huaraz, 07 de ABRIL de 2022.



Dr. PEDRO ALEJANDRO COLONIA CERNA

PRESIDENTE



Mag. JAVIER ALBERTO COTOS VERA

VOCAL



Dr. TITO MONER TINOCO MEYHUAY

SECRETARIO



Dr. TEOFANES MEJIA ANAYA

PATROCINADOR

(*) De acuerdo con el Reglamento de Tesis, éstas deben ser calificadas con términos de: APROBADO CON EXCELENCIA (19 - 20), APROBADO CON DISTINCIÓN (17 - 18), APROBADO (14 - 16), DESAPROBADO (00 - 13).

DEDICATORIA

El siguiente trabajo de tesis es el fruto de un gran esfuerzo no solo de mi parte sino también de mi familia; mi pareja que me apoyo totalmente en el camino y mi hija que con su reciente llegada me dio más fuerzas para superarme, por lo que este esfuerzo se los dedico muy especialmente a todos ustedes.

Así mismo se lo dedico especialmente a mi madre, que me crio y siempre estuvo y está conmigo en todas las etapas de mi vida, apoyándome incondicionalmente y regalándome todo su amor.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por regalarme salud y paz en cada momento de mi vida, brindándome tranquilidad y fe, guiándome en el camino a cumplir mis objetivos propuestos.

Agradezco a mi pareja, que me ha brindado todo su amor y apoyo incondicional para seguir adelante con nuestras metas, a mi hija que con su llegada me motivo infinitamente para crecer día a día, como persona y como profesional.

Agradezco a mi madre, que me enseñó con su ejemplo, el esfuerzo y responsabilidad en la vida. Por lo que es mi guía, mostrándome el camino del esfuerzo y la rectitud.

CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
CONTENIDO GENERAL.....	iii
CONTENIDO DE TABLAS.....	vi
CONTENIDO DE FIGURAS	vii
CONTENIDO DE ANEXOS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes del tema	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales	5
2.1.3. Antecedentes locales.....	7
2.2. Marco teórico	7
2.2.1. Precipitación	7
2.2.2. Métodos de medición y observación de la precipitación in situ	8

2.2.3. Métodos de medición y observación de la precipitación remota.....	8
2.2.4. Métodos de Análisis de Consistencia Hidrológica	9
2.2.5. Pruebas estadísticas de homogeneidad y consistencia de datos.	11
2.2.6. Satélite TRMM	12
2.2.7. Productos del Satélite TRMM	17
2.2.8. Métodos estadísticos de comparación de datos	19
III. MATERIALES Y METODOS	20
3.1. Materiales y Equipos.....	20
3.1.1. Materiales	20
3.1.2. Equipos y Softwares.	20
3.2. Métodos.....	20
3.2.1. Tipo de investigación.....	20
3.2.2. Nivel de investigación	21
3.2.3. Diseño de investigación.....	21
3.2.4. Población y Muestra	22
3.2.5. Técnicas, instrumentos de recolección de datos	23
3.2.6. Procesamiento de datos.....	24
3.2.7. Análisis de Resultados	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1. Resultados.....	35
4.1.1. Delimitación hidrográfica de la cuenca del río Casma.	35
4.1.2. Análisis de homogeneidad de datos de estaciones meteorológicas.	35
4.1.3. Completación de datos faltantes de precipitación	36
4.1.4. Análisis de consistencia de datos método de la curva doble masa	44

4.1.5. Estimación de valores medios de precipitación cuenca Casma.....	51
4.1.6. Precipitación media mensual del Satélite TRMM 3B43.	52
4.1.7. Análisis de datos de precipitación media mensual TRMM 3B43.	53
4.1.8. Comparación de series históricas de estaciones y TRMM 3B43.....	56
4.1.9. Comparación precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43.	66
4.2. Discusión de resultados.....	67
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Recomendaciones	70
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	71
VII. ANEXOS	74

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Lista de estaciones pluviométricas en la zona de estudio.	22
Tabla 2. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe	32
Tabla 3. Criterio de calificación de coeficiente de determinación.	34
Tabla 4. Prueba de homogeneidad serie histórica de estaciones meteorológicas.	36
Tabla 5. Datos completados estación Pira.....	37
Tabla 6. Datos completados estación Pariacoto.	38
Tabla 7. Datos completados estación Cajamarquilla.	39
Tabla 8. Datos completados estación Chacchan.	40
Tabla 9. Datos completados estación UNASAM.....	41
Tabla 10. Datos completados estación Yungay.	42
Tabla 11. Datos completados estación Buena Vista	43
Tabla 12. Resultados prueba de medias t-student estación Pariacoto.....	45
Tabla 13. Resultados prueba de medias t-student estación Cajamarquilla	47
Tabla 14. Resultados prueba de medias t-student estación Yungay.	49
Tabla 15. Prueba de homogeneidad de datos series históricas corregidas.	50
Tabla 16. Resultados valores medios mensuales de la cuenca Casma.....	51
Tabla 17. Precipitación media mensual TRMM 3B43 para la cuenca Casma.	52
Tabla 18. Prueba de consistencia y homogeneidad de datos TRMM 3B43.....	53
Tabla 19. Resultados prueba de medias t-student TRMM 3B43 corregido.	55
Tabla 20. Prueba de homogeneidad y consistencia TRMM 3B43 corregido.....	56

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Mapas tridimensionales generados por el radar de precipitación.....	15
Figura 2. Flujograma de procesamiento de datos de los productos TRMM.	18
Figura 3. Delimitación de la cuenca del rio Casma.	35
Figura 4. Curva doble masa serie sin corregir estación Pariacoto.	44
Figura 5. Curva doble masa serie corregida estación Pariacoto.....	45
Figura 6. Serie histórica estación Pariacoto serie corregida y no corregida.	46
Figura 7. Curva doble masa serie sin corregir estación Cajamarquilla.....	46
Figura 8. Curva doble masa serie corregida estación Cajamarquilla.....	47
Figura 9. Serie histórica estación Cajamarquilla serie corregida y no corregida.	48
Figura 10. Curva doble masa serie sin corregir estación Yungay.....	48
Figura 11. Curva doble masa serie corregida estación Yungay.	49
Figura 12. Serie histórica estación Yungay serie corregida y no corregida.	50
Figura 13. Valores de precipitación media mensual de la cuenca Casma.....	52
Figura 14. Curva doble masa precipitación media mensual del TRMM 3B43.....	54
Figura 15. Curva doble masa serie corregida TRMM 3B43.....	55
Figura 16. Serie histórica datos TRMM serie corregida y no corregida.....	56
Figura 17. Distribución temporal Pira y TRMM 3B43.....	57
Figura 18. Diagrama de dispersión estación Pira y TRMM 3B43.....	57
Figura 19. Distribución temporal estación Pariacoto y TRMM 3B43.	58
Figura 20. Diagrama de dispersión estación Pariacoto y TRMM 3B43.	59
Figura 21. Distribución temporal estación Cajamarquilla y TRMM 3B43.	59
Figura 22. Diagrama de dispersión estación Cajamarquilla y TRMM 3B43.....	60
Figura 23. Distribución temporal estación Chacchan y TRMM 3B43.	60

Figura 24. Diagrama de dispersión estación Chacchan y TRMM 3B43.....	61
Figura 25. Distribución temporal estación UNASAM y TRMM 3B43.....	62
Figura 26. Diagrama de dispersión estación UNASAM y TRMM 3B43.....	63
Figura 27. Distribución temporal estación Yungay y TRMM 3B43.	63
Figura 28. Diagrama de dispersión estación Yungay y TRMM 3B43.....	64
Figura 29. Distribución temporal estación Buena Vista y TRMM 3B43.....	64
Figura 30. Diagrama de dispersión estación Buena Vista y TRMM 3B43.....	65
Figura 31. Distribución temporal precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43.....	66
Figura 32. Diagrama de dispersión de precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43.....	67

CONTENIDO DE ANEXOS

Anexo 01: Mapa de ubicación de la cuenca Casma	74
Anexo 02: Mapa de ubicación estaciones SENAMHI en la cuenca Casma	74
Anexo 03: Mapa del área delimitada TRMM para la cuenca Casma.....	74
Anexo 04: Mapa precipitación media areal de la cuenca Casma.	74

RESUMEN

La investigación se realizó con el objetivo de analizar y comparar los datos de precipitación media mensual del satélite TRMM-3B43 y las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Casma, departamento de Ancash – 2021, en una serie histórica comprendida desde enero de 1998 hasta diciembre del 2018, para lo cual se aplicó una metodología de comparación de datos (medidos y estimados) mediante criterios estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de correlación (r), la eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual de Bias (BIAS). Los resultados del análisis mostraron correlaciones muy altas entre los datos estimados por el satélite y las estaciones meteorológicas de Pira, UNASAM y Yungay y altas para las estaciones de Pariacoto, Cajamarquilla y Chacchan, los coeficientes de determinación variaron desde 0.37 a 0.68, siendo estos resultados muy aceptables. Respecto a la precipitación media mensual de la cuenca Casma, los resultados de la comparación arrojaron un coeficiente de determinación de 0.66, una correlación de 0.82, una eficiencia de Nash y Sutcliffe de 0.60 y un sesgo porcentual de Bias igual a 31.71%, dichos resultados son muy satisfactorios y demuestran que los datos de precipitación media mensual generados por el satélite TRMM-3B43 tienen precisión a la hora de estimar los patrones de precipitación media para la cuenca, convirtiendo así a dichas estimaciones en una posible alternativa para la elaboración de estudios y modelaciones hidrológicas de cuencas carentes de información meteorológica y brindando ayuda en la gestión de los recursos hídricos.

Palabras Clave: Análisis comparativo, precipitación media, TRMM-3B43.

ABSTRACT

The research was carried out with the objective of analyzing and comparing the average monthly precipitation data from the TRMM-3B43 satellite and the meteorological stations located in the Casma river basin, department of Ancash - 2021, in a historical series from January 1998 to December 2018, for which a methodology of data comparison (measured and estimated) was applied using statistical criteria such as the coefficient of determination (R^2), correlation coefficient (r), Nash and Sutcliffe efficiency (NSE) and Bias Percentage Bias (BIAS). The results of the analysis showed very high correlations between the data estimated by the satellite and the meteorological stations of Pira, UNASAM and Yungay and high correlations for the stations of Pariacoto, Cajamarquilla and Chacchan, the coefficients of determination ranged from 0.37 to 0.68, being these results very acceptable. Regarding the mean monthly precipitation of the Casma basin, the results of the comparison yielded a determination coefficient of 0.66, a correlation of 0.82, a Nash and Sutcliffe efficiency of 0.60 and a percentage bias of Bias equal to 31.71%, these results are very satisfactory and demonstrate that the monthly average precipitation data generated by the TRMM-3B43 satellite are accurate when estimating the average precipitation patterns for the basin, thus making these estimates a possible alternative for the development of hydrological studies and modeling of basins lacking meteorological information and providing assistance in the management of water resources.

Key words: Comparative analysis, mean precipitation, TRMM-3B43.

I. INTRODUCCION

1.1. Planteamiento del problema

La precipitación es una de las variables climatológicas más importantes del ciclo hidrológico, esta tiene influencia directa sobre el clima, proporciona agua dulce a toda la superficie de la tierra e incide directamente sobre la forma en la que los seres vivos se desarrollan. (Rivas, 2014)

La variable climatológica de la precipitación es una de las variables más incidentes en la producción agrícola, la variabilidad temporal y espacial de la precipitación condiciona la situación de las campañas agrícolas, la producción normal de granos y de pasturas, además de la oferta hídrica en las partes bajas de la cuenca, una mala predicción de un clima lluvioso o de sequía conducirá a un mal planeamiento de campañas agrícolas, falta de previsión por avenidas extraordinarias y posibles pérdidas económicas y hasta humanas. (Brizuela, Nosetto, Aguirre, & Bressan, 2015)

Por lo que poder conocer el comportamiento más preciso posible de esta variable, será imprescindible para lograr una mayor eficiencia en el aprovechamiento hídrico y por ende la producción agrícola, además de poder ayudar a mitigar impactos y a disminuir posibles pérdidas materiales y humanas.

Es fundamental contar con datos de precipitación adecuados, significativos y homogéneos ya que estos nos darán la oportunidad de realizar estudios hidrológicos y modelamientos de buena calidad, los que a su vez brindarán mejores resultados a la hora de su aplicación en los campos de la agricultura, predicciones climatológicas, gestión de riesgos, diseños de estructuras

hidráulicas modelamientos entre otros. (Miranda, 2015)

La medición de la precipitación se realiza mediante instrumentos de medición como pluviómetros o pluviógrafos, que se instalan en las estaciones meteorológicas, sin embargo, la escasez de dichas estaciones, los errores en la toma de datos, su mala ubicación y la limitada representatividad (25 km alrededor de cada estación), ocasionan que los registros de datos históricos de precipitación tengan mucha variabilidad en el tiempo y no sean consistentes.

Esta problemática se agudiza debido otras dificultades para el registro de precipitación como las fallas o daños de los instrumentos de medición, falta de calibración y demás percances que pueden presentarse en las estaciones que albergan dichos instrumentos, en consecuencia, las estaciones dejan de recolectar información quedando de esta manera huecos en los registros históricos y obligando a estimar datos que en muchas ocasiones resultan muy lejanos a la realidad, limitando así una buena evaluación hidrológica.

La cuenca del río Casma se ubica en la región Ancash, en la provincia de Casma, es una cuenca exorreica que vierte sus aguas al océano Pacífico, dentro de su área y alrededores se ubican siete estaciones meteorológicas en funcionamiento repartidas en su mayoría en la parte alta de la cuenca, teniendo áreas vacías en la parte intermedia y baja, dejando áreas sin medición en la recolección de información, mismas que influyen directamente en la modelación hidrológica.

Una posible alternativa de solución a este problema es el uso de lluvias estimadas por satélites remotos debido a que se encuentran uniformemente distribuidos resultando de gran ayuda en el modelamiento hidrológico, sin embargo, se requieren estudios y comparaciones para su utilización en la

ingeniería, validando datos y recomendando posibles correcciones y consideraciones.

Así pues, surge como una alternativa el uso de datos de percepción remota (satelitales), que en la actualidad han evolucionado considerablemente y predicen mejor los datos de precipitación, brindándonos una alternativa para la realización de estudios hidrológicos.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la correlación existente entre los datos pluviométricos de precipitaciones medias mensuales del satélite TRMM 3B43 y los datos de las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Casma - Ancash?

1.3. Justificación

La investigación se justificó debido a que actualmente existe la necesidad de obtener datos de precipitación para zonas carentes de información, donde no se encuentren estaciones meteorológicas que puedan medir esta variable, realizando una comparación de datos de precipitación del satélite TRMM-3B43, con datos reales medidos en estaciones meteorológicas del SENAMHI para una cuenca hidrográfica, determinando si los productos del satélite tienen exactitud con los datos reales registrados en campo, de esta manera validando su utilización como complemento para zonas donde no existan registros de precipitación, brindando una alternativa de información mediante los datos generados por el satélite TRMM-3B43, para ser utilizados de manera complementaria ante la falta de datos reales tomados en campo, integrándose así en la línea de investigación referente a la gestión de los recursos hídricos y la ingeniería agrícola.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Analizar y comparar los datos de precipitación media mensual del satélite TRMM 3B43 y las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Casma, departamento de Ancash - 2021.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la homogeneidad y consistencia de los datos históricos de precipitación mensual de las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Casma.
- Realizar la comparación de los datos de precipitación media mensual de las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Casma, con los datos de precipitación media mensual producidos por el satélite TRMM 3B43.
- Determinar la correlación que existe entre los datos de precipitación media mensual representativa para toda la cuenca del río Casma y los datos de precipitación media mensual producidos por el satélite TRMM 3B43.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Antecedentes del tema

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Según (Rivas, 2014) en su estudio titulado “Análisis de la correlación de datos de precipitación entre el satélite TRMM y las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Bogotá”, que tuvo como objetivo analizar la calidad de los datos de precipitación del satélite TRMM,

mediante parámetros estadísticos comparados con la precipitación media mensual de las estaciones de la cuenca del río Bogotá, aplicando una metodología del tipo descriptiva – comparativa y concluyo que “los datos de precipitación media mensual del satélite TRMM para la cuenca del río Bogotá, tienen aproximadamente la misma tendencia de los datos de precipitación media mensual registrada en las estaciones pluviométricas según el parámetro estadístico coeficiente de correlación y pueden ser usados como complemento para estudios hidrológicos en la zona”.

Según (Brizuela et al., 2015) en su investigación titulada “Comparación de datos de precipitación estimada por TRMM con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina”, que tuvo por objetivo analizar los datos de precipitación estimados por el satélite (TRMM), conjuntamente con mediciones realizadas en seis estaciones meteorológicas, ubicadas en la provincia, durante los años 2010 y 2011, donde aplicó una metodología descriptiva – comparativa y concluyo que “para valores diarios de precipitación la asociación es baja o media, aunque superior en las estaciones automáticas, a su vez tanto en el caso de acumulada en ocho días como mensual existe una relación moderadamente fuerte que explica un 50% o más de la variabilidad”.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Según (Coaquira, 2018) en su estudio titulado “Análisis comparativo de precipitaciones medias mensuales, utilizando datos de Satélite TRMM y estaciones meteorológicas en la cuenca Huancané”. Donde tuvo como objetivo “Analizar y comparar las precipitaciones medias mensuales,

utilizando datos de satélite TRMM 3B43 y estaciones meteorológicas en la cuenca Huancané”. En dicha investigación se utilizó una metodología de tipo descriptiva - comparativa y se concluyó que “la comparación de datos brindó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.90, coeficiente de correlación (r) de 0.95 y un porcentual sesgo (BIAS) de 20.60% los cuales son muy aceptables, por lo que los datos del satélite pueden ser usados como alternativa a la falta de registros de precipitación en la zona”.

Según (Lujano Laura et al., 2015), en su estudio titulado “Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis - Puno”, que tuvo como objetivo validar las precipitaciones estimadas por el algoritmo 3B43 del satélite TRMM, con datos pluviométricos y su aplicación en la modelación hidrológica, donde utilizó una metodología de tipo descriptiva - comparativa y concluyó que “las precipitaciones estimadas por el algoritmo 3B43 del TRMM para la zona evaluada, muestran una eficiencia buena y pueden ser utilizados como datos de entrada en modelos hidrológicos en zonas sin información”.

Según (Asurza et al., 2018), en su estudio titulado “Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú”, que tuvo como objetivo evaluar los productos 3B42RT, 3B42V7 e IMERG en el modelamiento hidrológico en una cuenca del Altiplano peruano: cuenca del río Huancané, donde utilizó una metodología de tipo descriptiva - comparativa y concluyó que “el

producto 3B42V7 representa mucho mejor las descargas diarias, siendo el mejor producto a usar en ausencia de precipitación observada”.

2.1.3. Antecedentes locales

Según (Villavicencio, 2019), en su tesis titulada “Datos de precipitación y temperatura en zonas de escasa información de la región Ancash-período 2012-2017, 2019”, que tuvo como objetivo “generar datos para zonas con escasa información mediante la validación de los modelos de precipitación y temperatura para los satélites GPM y MERRA-2, en comparación con la información in situ (CIAD) en la región Ancash”, donde utilizó el modelo de Thomas Condom en regiones mayores a los 2000m para basar su regionalización de áreas en estudio para la precipitación y el modelo Andreas Fries para la temperatura, obteniendo resultados confiables tanto para la precipitación como la temperatura, exceptuando la zona costa donde el modelo no tiene buen comportamiento predictivo pudo concluir que “los datos de temperatura y precipitación de los satelitales MERRA-2, GPM y TRMMM tienen un comportamiento similar a los datos in situ, demostrando que los datos satelitales son una valiosa herramienta que puede ser usada en diferentes proyectos”.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Precipitación

La precipitación es cualquier forma de agua que cae del cielo incluye lluvia, nieve, neblina y rocío. La precipitación es generada por las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua se forman luego caen a la Tierra por gravedad.(Bateman, 2011)

2.2.2. Métodos de medición y observación de la precipitación in situ.

La precipitación es una variable climatológica cuya medición se lleva a cabo mediante instrumentos que permiten medir y/o estimar la cantidad de agua que cae en forma de precipitación hacia la tierra.(Vargas, 2015)

Los instrumentos y dispositivos más comunes para medir la precipitación in situ son los pluviómetros, pluviógrafos.

a) Pluviómetros

El pluviómetro es un instrumento que mide la cantidad de lluvia mediante un recipiente graduado tipo embudo, el cual almacena el agua que cae en su interior, este instrumento realiza mediciones cada 24 horas (Miranda, 2015).

b) Pluviógrafo

El pluviógrafo es un instrumento similar al pluviómetro, con la diferencia que el pluviógrafo brinda un registro continuo de la cantidad de lluvia que cae en el lugar donde se encuentra, lo que permite saber no sólo cuánto llovió hasta el momento en que se toma la lectura, sino también la distribución temporal de la lluvia (Miranda, 2015).

2.2.3. Métodos de medición y observación de la precipitación remota.

a) Radares

Los radares son instrumentos que monitorean y registran datos en la atmosfera, estos permiten evaluar la lluvia con una alta resolución, brindan una adecuada información en tiempo real y pueden abarcar un gran espacio (Moshinsky, 1995).

b) Satélites

La medición de la precipitación mediante satélites ha tenido un avance muy importante en la actualidad, estos son de gran utilidad ya que abarcan grandes extensiones tanto en la superficie terrestre como en los océanos.

De acuerdo con esto podemos definir un satélite meteorológico como una herramienta que emplea la observación del clima y la atmósfera, así como todos aquellos fenómenos relacionados a ella, este tipo de satélites proporcionan información actualizada de manera permanente y continua acerca de las condiciones climatológicas a nivel regional y global (Moshinsky, 1995).

2.2.4. Métodos de Análisis de Consistencia Hidrológica

La información hidrológica obtenida para los diferentes estudios hidrológicos debe pasar un análisis de consistencia mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que han podido ocurrir, sea por causas naturales u ocasionadas por la intervención de la mano del hombre (Villon Bejar, 2003).

El control de calidad de la información meteorológica se refiere a una serie de procedimientos o secuencia de pasos, cuyo fin es la obtención de la representatividad del dato, respecto a su magnitud real. Esta obtención de resultados depende no solo de las técnicas analíticas empleadas, también dependen de la calidad de los datos, densidad de la muestra, la homogeneidad de los datos, la coincidencia temporal de la observación entre estaciones. Entendemos como homogeneidad, a la serie de datos

meteorológicos que no han sufrido variaciones en la ubicación de la estación meteorológica, que no poseen datos anómalos, es decir que se trata de una serie representativa de la zona o lugar de estudio.

El análisis de consistencia de la información hidrológica se realiza mediante los siguientes procesos:

- Análisis visual gráfico.
- Análisis doble masa.
- Análisis estadístico.

a) Software Hydraccess

Este software fue desarrollado por el Ing. Philippe Vauchel del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) con la finalidad de ayudar a realizar trabajos de hidrología más fácilmente mediante el tratamiento de registros de datos de manera más sistemática.

El programa para su ejecución utiliza otros softwares como son Access y Excel, maneja una gran cantidad de datos de manera fácil y sistemática, además nos ofrece módulos para tratamiento de datos como son el vector regional o métodos para obtener precipitaciones medias en áreas determinadas de estudio.

El programa nos facilita:

- El almacenamiento de información de estaciones meteorológicas como son su ubicación, ráster de cuenca, red de ríos, inventario de datos, etc.).

- Nos ayuda a realizar el cálculo de datos diarios, mensuales y anuales a partir de datos instantáneos para lo cual utiliza el método de los trapecios.
- Nos permite elaborar curvas de calibración para caudales.
- Realizar las curvas de calibración para desarrollar líneas de caudales o curvas.
- El software incluye además una serie de módulos utilitarios que nos brindan la facilidad de realizar tratamiento de datos avanzados utilizando información de precipitaciones, caudales y sólidos.

2.2.5. Pruebas estadísticas de homogeneidad y consistencia de datos.

Dado que generalmente las series históricas de precipitación medidas en las estaciones meteorológicas tienen errores o vacíos, es necesaria una evaluación de esta información mediante criterios estadísticos o test, que nos indiquen si una serie de datos es homogénea y consistente para ser utilizados como base de datos para estudios hidrológicos.

Test de Mann Kendall.

Este test es una prueba no paramétrica que realiza una comparación de datos, aplicando criterios estadísticos de manera independiente para cada serie histórica de cada estación meteorológica. (López, Seoane, Fornero, Rodríguez, & Nuñez, 2007)

Prueba de medias de T-student.

Esta prueba es una de las más aplicadas en la hidrología, ya que nos indicará si existe diferencias significativas entre dos grupos de datos, como pueden ser dos grupos de series históricas de precipitación en distinto momento del

tiempo, la hipótesis plantea la contrastación de medias una serie de datos.
(Ray K. Linsley, Max A. Kohler, 1977)

2.2.6. Satélite TRMM

El satélite TRMM llamado así por sus siglas en inglés (Tropical Rainfall Measuring Mission) se lanzó al espacio el 27 de noviembre de 1997, su objetivo principal es el de monitorear y estudiar las precipitaciones ocurrida en las zonas tropicales y subtropicales del mundo, ya que en estas zonas es donde se producen más de 2/3 de la precipitación ocurrida en el mundo.

El satélite TRMM constituye la misión conjunta (japonesa-estadounidense) entre JAXA (Japan Aerospace and Exploration Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

a) Sensor de Datos TRMM

El satélite TRMM cuenta con un sensor el cual fue diseñado para observar las precipitaciones en las zonas tropicales y subtropicales, entre las coordenadas geográficas 35° N y 35° S, de manera global y coordinada.

El satélite TRMM registra las precipitaciones desde el año de 1998, dichos datos son tratados desde el Centro Espacial Tanegashima en Japón. La precipitación registrada puede ser a diferentes tipos de escala temporal teniendo escalas anuales, mensuales, semanales y diarias, para lo cual se aplican diferentes algoritmos, las escalas más pequeñas que produce el TRMM son los algoritmos 3B43/3B42 (0.25° x 0.25° ~ 27.8km x 27.8km) pudiendo incluso a lograr una resolución de 1km x 1km, mediante el uso del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el algoritmo TRMM 2B31.

b) Algoritmo 3B43

El Algoritmo 3B43 del satélite TRMM produce las estimaciones de precipitación mensualizada (TRMM) y otros datos más como los errores de medición.

Las estimaciones se realizan mediante cuadrículas con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, para todos los meses del año, desde su lanzamiento en 1997, además cubre toda el área de trópicos, desde la latitud sur 35° hasta la latitud norte 35° .

El Algoritmo 3B43 del satélite TRMM, es ejecutado una vez al mes durante todo el año, para producir esta cuadrícula de estimaciones de la precipitación y otros datos como la estimación de error de precipitación de RMS (3B43), realiza la combinación de los datos de precipitación de tres horas de alta calidad/IR con las estimaciones del Centro de Climatología Global de precipitación GPCC.

El proceso se realiza de la siguiente manera: se suman para el mes calendario las precipitaciones registradas para tres horas con alta calidad, con el radar equipado y a continuación, los datos del pluviómetro se utilizan para aplicar un ajuste de sesgo a gran escala a las estimaciones multi satelitales.

Finalmente, para obtener la estimación mensual de los satélites se utiliza la información satelital registrada y se corrige el sesgo con las mediciones realizadas directamente con los instrumentos de pluviómetros utilizando la ponderación de la varianza del error inverso.

El algoritmo aplicado es el análisis de precipitación multi satélite de la versión 7 TRMM.

c) Instrumentos de medición del Satélite TRMM

El satélite TRMM está compuesto por cinco instrumentos todos fundamentales a la hora de registrar e interpretar de los datos meteorológicos y plasmar la información a través de mapas elaborados con alta resolución. Estos instrumentos trabajan de manera simultánea y registran información conjunta, para brindarla a la red de investigación de la NASA y sus centros de investigación científica en tiempo real.

Estos instrumentos se detallan a continuación:

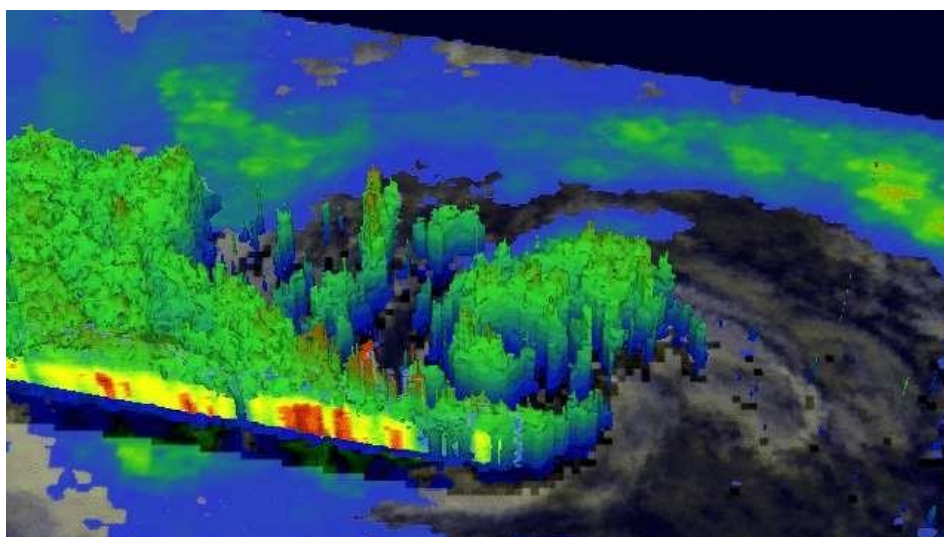
c.1) Radar de precipitación (PR)

Este instrumento es uno de los más importantes, proporciona los mapas tridimensionales que forman la estructura de la tormenta, es en base a estas medidas que se obtiene información muy importante a la hora de estimar la precipitación ocurrida, nos brinda intensidades de lluvia, tipos de lluvia, la distribución de la lluvia y las mediciones de alturas de derretimiento de nieves donde se generan las lluvias además de las profundidades de las tormentas.

Dicho instrumento también nos proporciona la información del calor liberado a la atmosfera a diferentes alturas, dicha información es muy útil a la hora de realizar modelamientos de circulación global de la atmosfera terrestre.

Los mapas generados por este instrumento nos muestran de forma inicial la magnitud de una tormenta, además nos brinda la información necesaria para estimar precipitaciones, sin embargo, en algunas ocasiones puede estimar lluvias ante tan solo presencia de nubes, lo que ocasiona errores.

Figura 1. Mapas tridimensionales generados por el radar de precipitación



Fuente: NASA, enero 2022.

La imagen muestra un ciclón tropical, captado por el radar de precipitación y el microondas de imagen, capaz de definir con precisión la intensidad de lluvia que tiene la tormenta, se puede observar también los perfiles verticales de lluvia, generados a partir del haz de luz, de este modo determina la acumulación de lluvia en una zona, a partir de su altura y nos brinda la información.

c.2) Imagen microondas (TMI).

El instrumento TMI es un sensor que detecta las microondas que a su vez brindan información acerca de las precipitaciones ocurridas en toda la franja que cubre el satélite TRMM (zona trópico y subtrópico), este instrumento mide las cantidades de energía de microondas que se emite de la tierra y la atmosfera, cuantifica en vapor de agua que se genera, mide el agua de la nubes y la intensidad de las precipitaciones ocurridas en la atmosfera, este instrumento es pequeño pero aporta gran información a la hora de la estimación de la precipitación. (Rivas, 2014)

c.3) Escáner Visible e Infrarrojo (VIRS)

El escáner VIRS es un instrumento que nos brinda un indicador indirecto de la precipitación, este escáner nos brinda información para comparar con otros satélites en órbita, como son el satélite POES, el satélite GOES.

Este instrumento también nos detecta la radiación que genera la tierra, tiene cinco bandas espectrales de medición como son las luces infrarrojas y las bandas visibles.

El instrumento utiliza la intensidad de la radiación para encontrar la luminosidad o la temperatura (IR) de la fuente.

Si el clima se encuentra despejado la temperatura medida correspondería a la temperatura terrestre, por el contrario, si existe nubosidad, la temperatura medida es la de tope de las nubes.

“Como las nubes más frías ocurren a mayores alturas, las temperaturas estimadas indican su altura y las nubes más altas pueden asociarse con la presencia de lluvia”. (Santos, 2017)

c.4) Las nubes y el sistema de energía radiante de la tierra (CERES).

Este instrumento genera data para ser utilizada en el estudio de intercambio de energías entre el sol y la atmosfera de la tierra, además de las nubes y el espacio exterior, este instrumento actualmente ya no registra información teniendo registro solo durante los periodos de enero agosto de 1998 y marzo del año 2000, teniendo un conjunto de datos muy limitado, sin embargo, sirviendo de referencia.

Este apartado aún sigue en estudio ya que entender el balance energético de la tierra y el sol aun es tema de estudio científico. (Rivas, 2014)

c.5) Sensor de Imágenes de Relámpagos.

Este instrumento nos permite detectar y localizar los relámpagos o rayos producidos por las tormentas en las regiones tropicales y sub tropicales de la tierra.

Este sensor nos proporciona información clave a través de sus instrumentos de medición observatorios TRMM, a 402 kilómetros sobre la tierra.

El sensor nos brinda de manera rápida y eficaz la información de ocurrencia de relámpagos, el tiempo de demora de información no sobrepasa los 30 segundos, dicho sensor permanece activo día y noche y ayuda a pronosticar diferentes fenómenos naturales, como son los posibles avisos de tormentas, así como tifones, huracanes severos. (Rivas, 2014).

2.2.7. Productos del Satélite TRMM

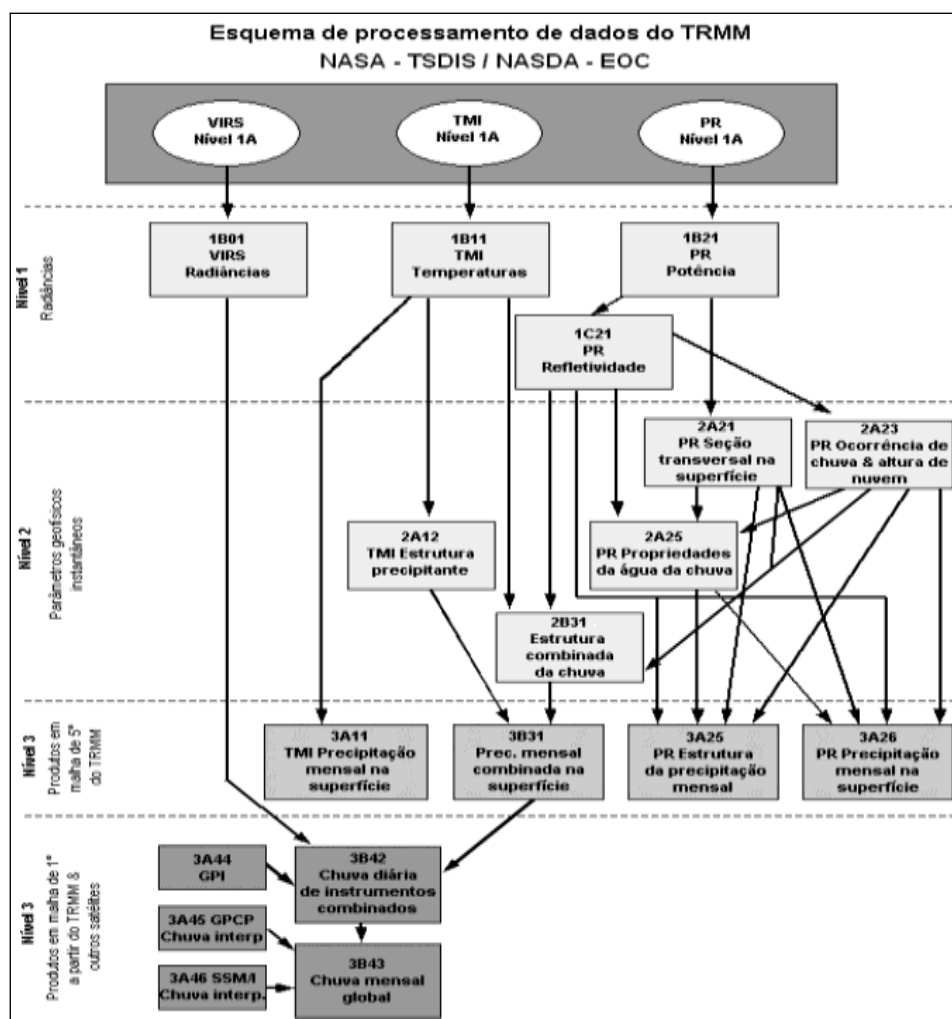
Los productos del satélite TRMM son producidos por distintos algoritmos que estiman la precipitación, estos están divididos de acuerdo a los niveles 1, 2 y 3 y están clasificados según su funcionalidad.

Nivel 1: se encuentran datos y de calibración para el instrumento PR (radar de precipitación).

Nivel 2: tiene productos que aumentan la resolución espacial respecto a las grillas y datos se determinan las alturas de precipitación.

Nivel 3: brinda data mensual de precipitación en grillas con resolución 25°x25°. (Rivas, 2014)

Figura 2. Flujograma de procesamiento de datos de los productos TRMM.



Fuente: Análisis de la Correlación de Datos de Precipitación Entre el Satélite TRMM y las Estaciones Pluviométricas Ubicadas en la Cuenca del Rio Bogotá. (Rivas, 2014).

d) La resolución temporal

La resolución temporal del producto 3B43 es mensual, es decir la frecuencia con que despliega imágenes es por mes dada la cobertura geográfica.

e) La resolución Espacial

El producto 3B43 posee una resolución horizontal de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, es decir cada pixel tiene una longitud de 27.853 km en cada lado. Cada imagen cuenta con 576.000 pixeles. Y cada pixel contiene un valor de precipitación acumulada para un solo mes.

2.2.8. Métodos estadísticos de comparación de datos

a) Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)

Es un criterio utilizado para cuantificar los resultados o para evaluar el poder predictivo de modelos hidrológicos o cuantificar la comparación de dos grupos de datos, fue propuesto por Nash & Sutcliffe y se puede utilizar para describir cuantitativamente la precisión de los resultados de modelos hidrológicos para descargas o resultados que se está evaluando. (Cabrera, 2009)

b) Sesgo porcentual (BIAS)

Indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados. Un BIAS positivo implica que la tendencia del modelo es a simular valores a la izquierda de las observaciones, y viceversa cuando es negativo, el valor óptimo del BIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican modelos de simulación precisa. (Lujano, Obando, Lujano, & Quispe, 2015)

c) Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación describe la proporción de la Varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo. (Lujano et al., 2015)

d) Coeficiente de correlación (r)

Corresponde a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación y es una medida del grado de asociación entre dos variables, si son completamente independientes el coeficiente de correlación toma valor cero. (Cabrera, 2009)

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. Materiales

- Papel bond A4, A3,
- Memoria USB 16 GB
- Tinta de Impresora
- Materiales de escritorio (lapiceros, borrador, marcadores, entre otros).
- Cartas Nacionales.

3.1.2. Equipos y Softwares.

- Laptop AMD Ryzen 5 2500U, RAM 8 GB, velocidad 2.8 GHz, 1000 GB memoria HDD y 250GB memoria SSD.
- Impresora multifuncional Epson L210 sistema continuo.
- Plotter.
- Fotografías digitalizadas.
- Bibliografía necesaria.
- ArcGIS 10.5
- Hydraccess v 4.5
- Microsoft Office Word 2018
- Microsoft Office Excel 2018

3.2. Métodos

3.2.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo descriptiva, ya que se buscó analizar y comparar el comportamiento y similitud de los datos de precipitación media mensual registrados por las estaciones meteorológicas del SENAMHI ubicadas en la

cuenca del río Casma y los datos generados por el satélite TRMM en su producto 3B43.

Tipo Descriptivo: Según (Fernandes Collado & Baptista Lucio, 2014) “La investigación descriptiva de investigación es el procedimiento usado en ciencia para describir las características del fenómeno, sujeto o población a estudiar, no describe por qué ocurre un fenómeno, sino que se limita a observar lo que ocurre sin buscar una explicación”.

3.2.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación referido al grado de profundidad con el que fue abordada la variable de investigación, fue de nivel descriptivo, ya que se analizó y comparó de manera descriptiva, observando el comportamiento y la similitud de la estimación para los de precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del SENAMHI y los datos generados por el satélite TRMM-3B43, mediante el uso de métodos estadísticos de comparación de datos.

Nivel Descriptivo: según (Hernández, 2014) “La investigación de nivel descriptiva es aquella que busca especificar las propiedades, características, y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”.

3.2.3. Diseño de investigación

Diseño no experimental: La investigación fue no experimental ya que no se realizó manipulación de variables y solo fueron tomadas y observadas tal como son en la realidad.

“Es la investigación en donde no se modifican intencionalmente las variables independientes. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos”. (Hernández, 2014)

3.2.4. Población y Muestra

a) Población:

La población para el trabajo de investigación estuvo constituida por el total de datos meteorológicos de precipitación registradas por las 07 estaciones meteorológicas del SENAMHI, ubicadas dentro y en la cercanía de la cuenca del río Casma y el registro de precipitaciones medias mensuales del satélite TRMM generados con su algoritmo 3B43.

A continuación, en la **Tabla 1**, se muestran los datos de ubicación y periodo de registro de las estaciones pluviométricas existentes dentro y en la cercanía de la cuenca del río Casma, además en el **Anexo 02**: Mapa de ubicación estaciones SENAMHI en la cuenca Casma. Se muestra el mapa de delimitación de la cuenca Casma y la ubicación de las estaciones pluviométricas.

Tabla 1. Lista de estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m)	Periodo de registro
Buena Vista	09°26'00.0"	78°12'00.0"	220	1964-2018
Pira	09°34'59.7"	77°42'25.1"	3570	1963-2018
Pariacoto	09°33'8.61"	77°53'15.41"	1312	1980-2018
Chacchan	09°32'6.68"	77°46'31.29"	2266	1998-2018
Cajamarquilla	09°37'55.36"	77°44'28.88"	3286	1963-2018
UNASAM	09°31'1.10"	77°31'59.21"	3052	1996-2018
Yungay	09°08'57.2"	77°45'01"	2537	1995-2018

Fuente: SENAMHI.

b) Muestra:

El tamaño de muestra estuvo compuesto por el conjunto de datos de precipitación acumulada mensual registrada en cada estación meteorológica del SENAMHI, además de los datos generados por el satélite TRMM 3B43, en un periodo de registro desde el año 1998 hasta el año 2018, comprendiendo 21 años de registro de datos, esto debido a que el satélite TRMM fue lanzado a órbita en el año 1997 y presenta registros de precipitación acumulada mensual desde el año 1998 hasta la actualidad, actualizando su base de datos generalmente cada dos años.

3.2.5. Técnicas, instrumentos de recolección de datos

a) Recolección de datos

En primer lugar, se realizó la recolección de información pluviométrica de la cuenca del río Casma, correspondiente a los datos de precipitación acumulada mensual de las 07 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en la cercanía de la cuenca, los cuales se descargarán del portal web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Posteriormente se descargaron los datos de precipitación acumulada mensual del satélite TRMM en su producto 3B43, de la página web de la NASA: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>.

b) Instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante la descarga de información de dos fuentes de información, en primer lugar la página web del SENAMHI que brinda información de registros de precipitación de las estaciones meteorológicas del Perú, mediante la siguiente dirección URL:

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos> y la NASA ingresando a la página web mediante la siguiente URL:

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>, posteriormente dichos datos fueron procesados y presentados mediante un cuadro de registro donde se ordenó la información de precipitación por cada año y mes, esto se realizó tanto para los registros de precipitación media mensual de las 07 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en la cercanía de la cuenca del río Casma, como para los datos del satélite TRMM generados a partir de su algoritmo 3B43.

3.2.6. Procesamiento de datos

a) Obtención de los datos de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas.

Los datos de precipitación mensual se obtuvieron de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del río Casma y sus cercanías, dichos datos fueron descargados de la página web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), referida líneas arriba.

b) Prueba de homogeneidad de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Para comprobar si los datos de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Casma eran homogéneos y consistentes y determinar una estación base que sirva de estación auxiliar para completar datos faltantes de otras estaciones vecinas, se aplicó el test de homogeneidad de Mann Kendall y la prueba de medias de T-student respectivamente.

Las fórmulas para la aplicación de las dos pruebas se detallan a continuación:

Prueba de Mann Kendall

Según (López et al., 2007) esta prueba es no paramétrica y usa los registros de precipitación de manera independiente para cada estación, aplicando criterios estadísticos mediante las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{s - 1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$S = T - I \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} si \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} ti \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

V : Valor a comparar con V critico (tabla).

S : Índice de desviación calculado.

n : Numero de datos de la serie

H0: Si V calculado es menor que V critico (tabla), significa que la serie es homogénea.

H1: Si V calculado es mayor que V critico (tabla) significa que la serie es no homogénea.

Prueba de medias de T-student.

Esta prueba se realiza cuando se requiere contrastar una hipótesis planteada, para lo cual es necesaria la contrastación de medias para la serie de datos de un grupo 1 y un grupo 2. (Ray K. Linsley, Max A. Kohler, 1977)

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$T_c = \frac{X_1 - X_2}{\delta dif} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$\delta dif = S \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$S = \sqrt{\frac{S_1^2(N_1 - 1) + S_2^2(N_2 - 1)}{(N_1 + N_2 - 2)}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$GL = N_1 + N_2 - 2 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

Tc : Valor calculado.

S1; S2 : Desviación estándar serie 1 y serie 2.

N1; N2 : Numero de datos de la serie 1 y serie 2.

X1; X2 : Media de datos de la serie 1 y serie 2.

H0: Si T calculado es menor que T critico (tabla), las medias son estadísticamente iguales, no existe inconsistencia entre las dos series.

H1: Si T calculado es mayor que T critico (tabla), las medias no son estadísticamente iguales, existe inconsistencia entre las dos series.

c) Estimación de Datos Faltantes

Dado que los datos de las estaciones meteorológicas de la cuenca Casma tuvieron vacíos en sus registros de precipitación, estos pasaron en primer lugar por un proceso de completación, para dichos casos se aplicaron métodos estadísticos de completación de datos faltantes, tales como el método de regresión lineal y el método de promedios vecinales, los cuales se describen a continuación:

c.1) Método de regresión lineal.

Según (Romero, Casimiro, Nacional, La, & Meteorología, 2015), la regresión lineal es el método más utilizado para la estimación de datos faltantes mensuales y anuales, el método establece una regresión lineal y correlación con una estación vecina que tenga datos consistentes, y completa los datos faltantes mediante una ecuación lineal de dos variables.

La ecuación lineal propuesta es la siguiente:

$$y = a + bx \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

Y : Precipitación estimada.

X : Precipitación de la estación patrón.

a y b : Constantes de la regresión lineal.

El coeficiente de correlación (R) de la regresión lineal, nos indicara cual es la estación con más relación a la estación base, la cual queremos completar, dicho coeficiente para ser aceptable debe ser mayor a 0.7. (Romero et al., 2015)

c.2) Método de los promedios vecinales

Para utilizar este método de completación se tuvo en cuenta que las estaciones vecinas estén ubicadas alrededor de la estación a completar, este método se utilizó para completar datos faltantes de un mes o año. (Romero et al., 2015)

Para esto se utilizará la ecuación siguiente:

$$PX = \sum_{i=1}^n \frac{Pi}{n} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

Pi : Es la precipitación de las estaciones A, B, C.

n : Es el número de estaciones vecinas.

d) Análisis de consistencia de datos de precipitación mediante el método de la curva doble masa.

Una vez completada la serie de registro de datos de precipitaciones mensuales, se realizó el análisis de consistencia de datos con la finalidad de corregir inconsistencias mediante el método de la curva doble masa, aplicando las siguientes ecuaciones:

Según el factor de corrección de la pendiente de la curva de doble masa está dada por:

$$K = \frac{m2}{m1} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde

m1 : Pendiente de la curva de doble masa antes del quiebre.

m2 : Pendiente de la curva de doble masa después del quiebre.

A cada dato pluviométrico se corrige mediante la ecuación:

$$Yc = Ky \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde

Yc : Dato corregido

K : Factor de corrección.

Y : Dato sin corregir.

e) Métodos de Interpolación para determinar valores medios mensuales de la cuenca Casma.

Para poder obtener los valores medios mensuales representativos de la cuenca del río Casma, se utilizó la información de las estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río Casma y sus cercanías y se aplicó el método IDW (ponderación por distancia), ya que este método relaciona mejor los valores de precipitación respecto a la distancia y la cercanía existente entre cada estación, para este caso el cálculo se ejecutó mediante la aplicación del programa Hydraccess 4.5. y la representación gráfica se realizó mediante el software ArcGIS 10.5.

f) Obtención de datos de precipitación media mensual del Satélite TRMM en su producto 3B43, representativos de la cuenca del río Casma.

Para poder obtener los datos de precipitación media mensual del satélite TRMM en su producto 3B43, en primer lugar, se delimitó mediante coordenadas geográficas el área que contiene a la cuenca del río Casma, en este caso el área de coordenadas fue desde las coordenadas ($77^{\circ}35'00''W$; $9^{\circ}45'00''S$) hasta ($78^{\circ}25'00''W$; $9^{\circ}10'00''S$).

Posteriormente para la descarga de datos se ingresó a la página web de la NASA: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>, donde se indicó en el cuadro de dialogo de búsqueda, el producto TRMM 3B43 precipitación acumulada mensual y se procedió a la descarga de datos delimitando las coordenadas del área de la cuenca y el periodo de registro deseado, en este caso desde enero del año 1998 hasta el diciembre del año 2018.

Una vez descargados los datos de precipitación acumulada mensual del satélite TRMM 3B43, se ordenó toda la información mediante un cuadro resumen de número de años vs precipitación acumulada de cada mes.

g) Análisis de datos de precipitación media mensual del satélite TRMM 3B43.

Se realizó el análisis de homogeneidad y consistencia de datos de precipitación del satélite TRMM para la cuenca Casma, para observar si los datos de precipitación son homogéneos, para lo cual se aplicó la prueba de homogeneidad de Mann Kendall.

Así mismo, también se realizó la prueba T-student, para analizar la consistencia de datos y realizar las posibles correcciones en los registros mediante el método de curva doble masa.

h) Comparación de datos de precipitación obtenidos del satélite TRMM 3B43 con los datos registrados en las estaciones meteorológicas de SENAMHI de la cuenca Casma.

En primer lugar, se realizó una comparación visual del comportamiento de los datos de precipitaciones medias mensuales del satélite TRMM 3B43 y los datos registrados por las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), graficando las series históricas de cada estación meteorológica de la cuenca del río Casma, con la serie histórica de los datos del satélite TRMM 3B43, observando su correlación y determinando las posibles inconsistencias producidas en las series de datos.

Luego se procedió a la comparación visual de la serie histórica de precipitación media mensual de la cuenca del río Casma, con la serie de datos generados por el satélite TRMM 3B43, observando y determinando las posibles inconsistencias producidas en las series de datos.

Posteriormente se aplicaron los siguientes criterios estadísticos para comparar la serie de datos históricos de valores medios de precipitación mensual de la cuenca del río Casma y datos del satélite TRMM 3B43.

Para esto se graficaron los datos mediante una recta, teniendo en las ordenadas los datos de las estaciones del SENAMHI y en las abscisas los datos estimados del satélite TRMM 3B43.

i) Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)

Según (Cabrera, 2009), este criterio permite cuantificar la eficiencia de los datos estimados del modelo (datos del satélite TRMM 3B43) respecto al modelo observado (datos observados en las estaciones del SENAMHI).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

NSE: Eficiencia de Nash – Sutcliffe

n: Número de observaciones

x_i : Valor observado

\hat{x}_i : Valor estimado por el modelo

\bar{x} : Promedio de los datos observados

La NSE, fue clasificado según (Cabrera, 2009) según la tabla 2.

Tabla 2. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

Eficiencia	Clasificación
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: (Cabrera, 2009)

ii) Sesgo porcentual (BIAS)

Este criterio muestra la tendencia promedio de los datos simulados (datos del satélite TRMM 3B43) de ser mayores o menores que los datos observados (datos observados en las estaciones del SENAMHI).

Un BIAS positivo nos indica que la tendencia del modelo es a simular valores sobreestimados respecto de las observaciones, y viceversa cuando es negativo, el valor óptimo del BIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican modelos de simulación precisa. (Lujano et al., 2015)

Utiliza la siguiente ecuación:

$$BIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) * 100 \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

y_i = valor observado

\hat{y}_i = valor calculado

i) Correlación entre los datos del satélite TRMM 3B43 y estaciones meteorológicas de SENAMHI

Se determinó la correlación que existe entre los valores medios de precipitación mensual representativos de la cuenca del río Casma y los valores medios de precipitación mensual estimados por satélite TRMM en

su producto 3B43, utilizando una gráfica de dispersión teniendo el registro de precipitación de estaciones meteorológicas vs el registro de precipitaciones estimadas por el TRMM 3B43.

Luego se obtuvo en primer lugar el coeficiente de determinación (R^2) y finalmente el coeficiente de correlación (r), utilizando las siguientes ecuaciones.

Coefficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación describe la proporción de la varianza en los datos observados y los datos estimados por el modelo de estimación de valores.

$$R^2 = 1 - \frac{(n - 1) \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

R^2 : Coeficiente de determinación

n : Número de observaciones

x_i : Valor observado

\hat{x}_i : Valor estimado por el modelo

\bar{x} : Promedio de los datos observados

El coeficiente de determinación fue clasificado bajo los criterios de: Muy bueno >0.95 , bueno de $0.85 - 0.95$, satisfactorio de $0.65 - 0.85$ e insatisfactorio <0.65 . En el caso de un predictor perfecto R^2 es 1. (Andersen, Refsgaard, & Jensen, 2001)

Coefficiente de correlación (r)

El coeficiente de correlación corresponde a la raíz cuadrada del coeficiente

de determinación y es una medida del grado de asociación entre dos variables.

Si son completamente independientes el coeficiente de correlación toma valor cero.

$$r = \sqrt{R^2} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

R^2 : Coeficiente de determinación

r : Coeficiente de correlación

Según (Barría, 2010) el coeficiente “ r ” fue clasificado bajo los criterios de:

Tabla 3. Criterio de calificación de coeficiente de determinación.

r	Clasificación
0.20 – 0.30	Muy Bajo
0.40 – 0.50	Bajo
0.6 – 0.70	Alto
0.8 – 1.00	Muy Alto

Fuente: (Barría, 2010)

3.2.7. Análisis de Resultados

El análisis de los resultados se realizó mediante el contraste de los datos obtenido del coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de correlación, el criterio de la eficiencia de NASH y el sesgo porcentual de BIAS, comparando y contrastando los resultados según la teoría.

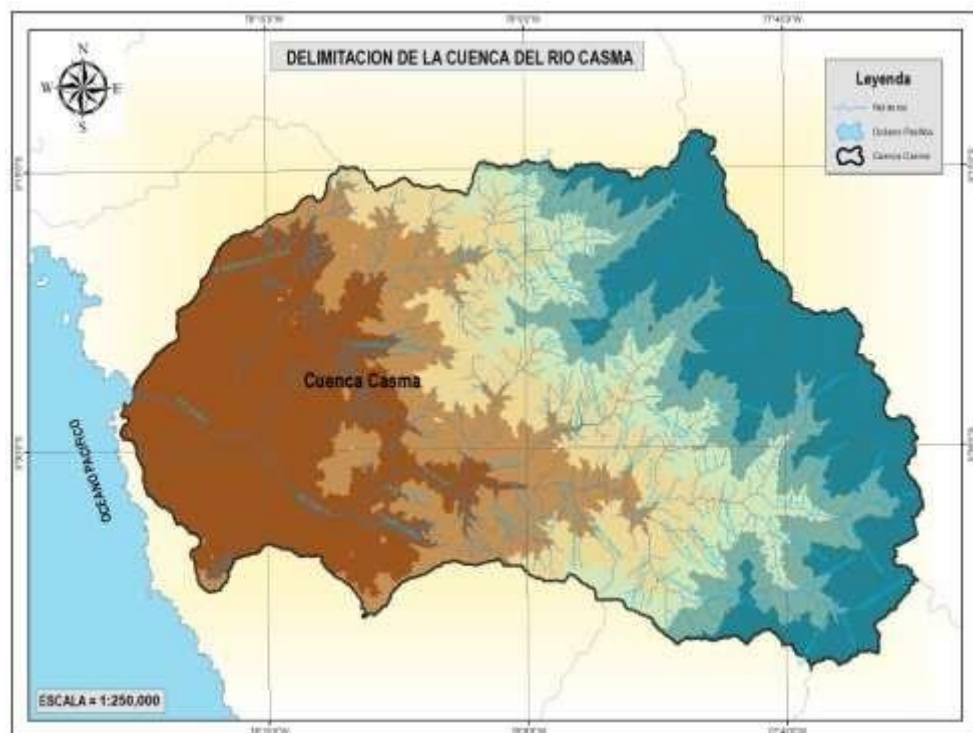
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Delimitación hidrográfica de la cuenca del río Casma.

La cuenca del río Casma forma parte de las provincias de Casma, Yungay, Carhuaz y Huaraz del departamento de Ancash, vierte sus aguas al océano pacífico.

Figura 3. Delimitación de la cuenca del río Casma.



4.1.2. Análisis de homogeneidad y consistencia de datos de estaciones meteorológicas.

Para observar si los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Casma son homogéneos y determinar una estación base que nos sirva de estación auxiliar para completar datos faltantes de otras estaciones vecinas, se aplicó la prueba de homogeneidad de Mann Kendall

y la prueba de medias de T-student, los resultados se muestran en la Tabla

4. Prueba de homogeneidad

Tabla 4. Prueba de homogeneidad serie histórica de estaciones meteorológicas.

Estación	Prueba T-student (NC = 95%)			Prueba de Mann Kendall (NC = 95%)		
	T $\alpha/2$	Tc	Conclusión	V $\alpha/2$	Vc	Conclusión
Buena Vista Alta	1.969	-1.8	Consistente	1.96	0.829	Homogénea
Pira	1.969	1.018	Consistente	1.96	-1.129	Homogénea
Pariacoto	1.969	5.637	Inconsistente	1.96	-3.048	No homogénea
Chacchan	1.969	0.321	Consistente	1.96	-1.88	Homogénea
Cajamarquilla	1.969	-4.260	Inconsistente	1.96	2.975	No Homogénea
UNASAM	1.969	0.048	Consistente	1.96	-0.327	Homogénea
Yungay	1.969	-2.162	Inconsistente	1.96	1.529	Homogénea

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar según el test de Mann Kendall y la prueba de T-student, con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$), se tiene que las estaciones de Pariacoto y Cajamarquilla son no homogéneas e inconsistentes además la estación Yungay es inconsistente, por lo que requieren una corrección de su serie histórica.

Se observa también que la estación Pira es homogénea y consistente, además es la que cuenta con datos completos para el rango de años escogidos desde 1998 hasta 2018, por lo que dicha estación será tomada como estación base, para la completación de datos faltantes de estaciones vecinas.

4.1.3. Completación de datos faltantes de precipitación

Se procedió a realizar la completación de datos en los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas, utilizando el método de promedios vecinales y regresión lineal, teniendo como estación auxiliar la estación Pira.

Los registros de datos precipitación completados de cada estación se muestran a continuación.

Tabla 5. Datos completados estación Pira.

ESTACIÓN PIRA PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación:		PIRA		Latit.:		-9.58		Elevación:		3570 msnm		
Serie histórica:		1998 - 2018		Long.:		-77.71		Departamento:		Ancash		
Código de estación:		154110		Tipo:		Climática		Cuenca:		Casma		
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	178.8	223.2	241.5	69	8.2	21.8	0	0	17.3	67	6.3	73.1
1999	125.9	352.9	113.4	111	20.1	1.1	2.1	0	15	25.9	33	60.4
2000	116.6	286.5	172.7	105.5	13.2	0	2.3	5	14.6	20.1	23	114.4
2001	202.7	91.5	249.9	76.8	15.2	0	0.7	0	25.4	46.9	102.1	60.2
2002	45.6	153.2	194.1	101.8	3.2	0.9	1	0	14.2	75.9	88.8	82.7
2003	82.6	85.6	112.8	27.7	3.9	1.7	0	0	0	23.4	15.7	124.1
2004	21	68	75.7	58.7	2.7	2.2	0	0	16.1	59.6	61.8	81
2005	53	65.4	134	40.6	3.2	0	0	0.4	0.5	13.3	6.2	93.6
2006	79.9	94.4	251.1	104.5	1.5	0	1	0.6	5	28.4	38.9	95.3
2007	78.4	48.3	197.6	109.6	13.7	2.4	0.7	0.3	0.5	38.5	28.7	24.4
2008	136.5	179	178.9	86.3	0.2	2.5	0	0	1.4	77.3	34.8	21.8
2009	210.1	184.2	177.1	94.5	3.8	0.2	0.2	7.9	2.2	86.9	77	46.4
2010	53.7	47.4	125.5	35.5	12.2	1.5	0	0.5	6.1	21.7	31.3	139.6
2011	116	57.9	90.3	111.5	2.3	0.2	1.5	2.6	6.3	5.4	62.2	121.71
2012	67.2	162.1	125.5	100.8	7.8	1.8	0	0	27.3	39.9	93.3	56.7
2013	30.7	137.8	246	25.3	11	0	0	0.2	6.7	82.2	33.6	83.6
2014	61	93.8	186.1	52.7	27.7	0	1.4	0.2	9.7	31.5	46.8	115.3
2015	50.7	90.9	196.6	65.1	22.8	0.5	3.4	0	5.4	36.3	29.1	59.6
2016	28.3	108.4	87.8	35.1	0.8	0.3	0	0	18.8	4.7	2	48.4
2017	148.2	156	355.5	39.1	13.8	1.6	0	0.2	14.6	47.4	30.5	40.4
2018	124.7	65.6	143.1	75	35.7	0	0	0	1.6	11.8	57.9	66.2

Fuente: SENAMHI.

Tabla 6. Datos completados estación Pariacoto.

ESTACIÓN PARIACOTO PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación: PARIACOTO			Latit.: -9.56			Elevación: 2000 msnm						
Serie histórica: 1998 - 2018			Long.: -77.89			Departamento: Ancash						
Código de estación: 150904			Tipo: Climática			Cuenca: Casma						
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	146.2	260.3	191	40.6	0.7	0.8	0	0	0.8	3.1	1.6	0
1999	32.4	220.4	14.7	13.5	2.4	0	0	0.3	1.4	6.7	8.7	14.1
2000	39.7	76.7	37.2	13.3	5.3	0	0	0.5	1.8	2.7	3.8	28.6
2001	46.2	26.8	47.9	11.2	2.9	0	0	0	3.9	2.3	2.6	4.1
2002	1.3	104	25.6	13.3	2.5	0	0	0	1.7	6.4	18.7	2.4
2003	13.1	18.2	20.4	3.3	0	0	0	0	0.2	10.7	0.8	23.6
2004	6.3	19.2	22.3	37.9	0	0	0	0	2.8	11.6	9.6	11.6
2005	14.8	10.4	24.2	5.5	0	0	0	0	0.3	4.2	0.7	7
2006	22	36.3	46.6	5.5	0	0	0	0	0	0	7.3	11.3
2007	7.3	8.3	47.6	15.3	0	0	0	0	0	8.4	0.8	7.3
2008	42.6	54.5	47.8	58.7	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	106.6	117.6	23.8	20.1	0	0	0	0	0	3	7.9	2.5
2010	11.5	37.7	13.6	3.3	1	0	0	0	1.3	4	5.7	19.7
2011	20.5	0	5	9.3	0	0	0	0	0	0	3.5	21.9
2012	0.5	34.4	6.6	2	0	0	0	0	3.4	3.2	3.6	16.2
2013	0	30.1	34.3	0	0	0	0	0	1.2	1	0	0
2014	9.6	6.9	11.8	0	0	0	0	0	0	0	5.3	11.5
2015	2	20.5	57.7	1.4	0	0	0	0	0	0	0	2.4
2016	3.6	27.2	24	0	0	0	0	0	0	0	0	2.7
2017	28.4	102.5	156.2	1.7	0	0	0	0	1.7	6	2	6.4
2018	25.6	17.9	27.1	17.4	0	0.5	0	0	0	0	9.8	12.7

Fuente: SENAMHI.

Tabla 7. Datos completados estación Cajamarquilla.

ESTACIÓN CAJAMARQUILLA PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación:	CAJAMARQUILLA				Latit.:	-9.63	Elevación:	3028	msnm			
Serie histórica:	1998 - 2018				Long:	-77.74	Region:	Ancash				
Código de estación:	154108				Tipo:	Climática		Cuenca:	Casma			
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	117.6	159.4	183.4	77.8	17.6	0	0	0	5.1	14.3	13.8	39.1
1999	102.2	352.9	100.2	108	39.6	0	0	0	21.7	60.6	62.5	134.5
2000	107	206	136.5	52.3	38.9	0	0	0	19.7	23	14.7	120.2
2001	183.5	94.1	215.2	54.2	5.3	2.6	0	0	17.9	28.2	86.6	23.4
2002	23.7	97.4	125	92.2	3.4	0	0	0	4.1	75.1	98.3	45.3
2003	101.3	63.2	58.8	30.5	6.7	1.3	0	0	0	15.3	6	211.8
2004	12.6	53.6	128	33.3	0	0	0	0	0	32.2	56.7	74.7
2005	22.6	25.9	172.4	81	0	0	0	0	0	0	0	85.8
2006	149.2	270.3	311	102.5	0	0	0	0	0	0	33.1	199.8
2007	161.9	0.6	281.4	119.9	33.3	0	0	0	0	53.8	44.3	0
2008	324.7	332.6	549.4	331.3	0	0	0	0	5.4	383.2	375.5	2.5
2009	387.8	526.3	535.3	151.4	0	0	0	0	0	178.6	348	166.9
2010	70.2	87	336.6	51.4	0	0	0	0	16.9	0	102.3	208.4
2011	356.7	106.4	239.6	487.5	0	0	0	6.4	18.8	0	208.6	512.3
2012	360.2	436.8	671	476.3	0	0	0	0	82.3	136.2	37.4	241.6
2013	48.6	412.5	322	108.1	0	0	0	0	24	1110.2	99.2	101.2
2014	67	237.6	403.4	89.6	0	0	0	0	27.6	43.8	105.4	426.4
2015	281.2	105.2	598.6	166.8	162.6	0	0	0	36.4	107.4	108.2	149.4
2016	87.2	348.8	365	13.8	0	0	0	0	41.2	0	0	14
2017	367	411.8	661.3	119.2	0	27	0	0	79.6	39.4	27.4	0
2018	221.4	149.2	391.6	126.6	19.4	0	0	0	0	0	16.8	32.7

Fuente: SENAMHI.

Tabla 8. Datos completados estación Chacchan.

ESTACIÓN CHACCHAN PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación: CHACCHAN			Latit.: -9.54			Elevación: 2266 msnm						
Serie histórica: 1998 - 2018			Long.: -77.78			Departamento: Ancash						
Código de estación: 154107			Tipo: Meteorológica			Cuenca: Casma						
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	126.2	149.2	177.4	0	0	0	0	0	13.8	52.82	4.8	41.2
1999	61.8	240.4	37.6	44	11.4	0	0	0	2.5	4.5	15	14.2
2000	37.9	132.5	85.8	32.4	11.8	0	0	2.2	2.5	3.5	9.9	58.4
2001	87.6	51.9	98.5	24.2	0	0	0	0	17.5	0	47.8	6.7
2002	2.9	114.4	70.2	27.4	0	0	0	0	3	14.9	25.4	6.1
2003	9.3	35.5	43.3	10.7	0	0	0	0	0	9.1	1.5	68.2
2004	5.1	18.8	30	21.9	0	0	0	0	1	18.8	17.6	24.3
2005	0	15.1	47.8	4.5	0	0	0	0	0	0	0	44.5
2006	34.7	42.6	132	57	0	0	0	0	0	3.5	20.6	36
2007	39.7	25.6	89.3	55.2	6.2	0	0	0	0	4.6	12.6	15.8
2008	103.3	83	133.4	28.5	0	0	0	0	0	72.6	9.1	0
2009	109	136.4	102.1	83.6	18.5	0	0	0	0	24.1	40.7	124.9
2010	87.7	17.4	21.5	9.9	0	0	0	0	0	0	0	71
2011	106	15.7	71	19.3	0	0	0	0	0	3.9	26.5	91.1
2012	27.7	84.9	79.2	47.7	0	0	0	0	0	0	15.4	13.1
2013	0	130.2	92.1	0	0	0	0	0	0	9.5	0	51.5
2014	11.8	71.1	98.1	13.8	0	0	0	0	0	6.4	13.1	51.1
2015	19.9	44	97.1	20.4	0	0	0	0	0	8.6	6.7	24.8
2016	4.4	56.1	24.8	4.4	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	135.1	101.8	242.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018	91	43.5	71.9	8.8	0	0	0	0	0	0	0	23.2

Fuente: SENAMHI.

Tabla 9. Datos completados estación UNASAM.

ESTACIÓN SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO												
PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación:	UNASAM			Latit.:	-9.52			Elevación:	3079 msnm			
Serie histórica:	1998 - 2018			Long.:	-77.52			Departamento:	Ancash			
Código de estación:	426			Tipo:	Climática			Cuenca:	Santa			
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	194.9	233	170.9	159.1	18.7	0	0	0	10.2	135.2	71.2	79.1
1999	114.2	276.25	138.8	99.53	60.2	6.7	3.7	0	63	19.8	117.5	139.8
2000	59.6	153.7	183.4	113.1	84.9	1.9	1.7	10.4	22.4	39	40.1	216.8
2001	167.5	105.5	210.1	97.1	44.4	4.1	2.4	2.1	28.01	49.1	105.6	49.6
2002	95.3	170.42	179.9	109.7	16.6	0.6	0	0	15.7	100.6	137	124.4
2003	102.9	60.9	134.9	94.3	28.65	3.6	1.4	1.6	7.5	29.5	31.6	169.6
2004	61.5	111	73	51.8	23.5	4.2	15.8	0	49	102.6	91.6	103.5
2005	152.6	87.7	210.1	34.6	2.9	0	0	8	4.5	44.9	20.1	111.3
2006	107.1	100.8	236.9	146.1	4.8	17.2	1.6	5.2	14.4	49.5	53.4	153.9
2007	103.9	83.6	173.6	186.9	31.4	1.1	6.9	0.9	8	102.2	57.8	62.1
2008	160.8	148.2	106.4	87.7	2.2	7.4	9.8	3.1	23.7	133.1	41	95.7
2009	174.4	146.7	224.2	120.9	30.2	9.1	0.3	2.2	2	150.5	135.3	189.1
2010	102.3	49.4	124	64.3	54.3	6.1	0	3.4	27.8	29.2	109	191.5
2011	90.4	68.2	108.1	117.6	0.7	0	4.1	1.1	11	28.2	98.9	160.3
2012	104	142.6	193.2	180.2	17.8	5.9	0	0	26.4	42.6	100.7	107.1
2013	88.7	137.3	170.8	39.8	21.3	0	0.4	4.7	5.9	97.6	66.6	146.6
2014	124.3	179.3	170.3	91.1	74.4	7.1	2.7	3.9	34.9	47.7	53	197.4
2015	147.5	52.4	145.1	84.7	62.7	2.8	5	0.1	20.3	74.1	94.1	137.1
2016	59.4	184.9	123	53.1	13.1	4.5	0.2	0.4	36.3	36.1	2.6	105.2
2017	129.2	139.8	288.8	150.5	91.9	1	0	3.3	31.2	65.3	55.3	120
2018	145.6	76.6	184.5	119.6	75.3	0.7	0.4	4.8	28.3	61.2	73.5	138.2

Fuente: SENAMHI.

Tabla 10. Datos completados estación Yungay.

ESTACIÓN YUNGAY PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación:	YUNGAY		Latit.:	-9.14		Elevación:	2537		msnm			
Serie histórica:	1998 - 2018		Long.:	-77.75		Region:	Ancash					
Código de estación:	444		Tipo:	Climática		Cuenca:	Santa					
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	105	195.4	163.6	72.2	0	0	0	0	4.2	44	13.6	43.6
1999	66.6	100.6	37.8	40.6	10.2	0	0	0	8.4	4.8	38.6	43
2000	48.1	66.6	40.8	60	23	0	0	5.6	17.4	15.8	11.7	71.1
2001	102.3	57	190.2	53.6	3.4	0	0	0	7.9	11	102.7	65.8
2002	127.4	117.8	390.6	95.4	0	0	0	0	0	271.9	373.9	138.4
2003	213.4	135	135.4	21.4	0	0	0	0	0	3.2	20.6	142.5
2004	45.8	177.4	58	71.5	0	0	0	0	6.9	107.8	81	69.1
2005	39.5	93.9	179.5	64.7	2	0	0	0	13.8	22	0	113
2006	60.4	157.7	287.6	191.6	0	3.4	0	2.6	4.3	13.6	59.9	240
2007	78.3	27.3	474.2	182.9	38.4	0	0	3.1	5.5	75.3	78.8	46.2
2008	119.9	119.8	231.7	101.6	9.2	15.4	0	0	1.1	113.8	71.2	9
2009	223.3	131.4	207.5	107.4	12.8	0	0	1.8	0	172.5	108.5	73.6
2010	63.7	120.4	137.8	74.6	26.1	4.2	0	0	4.2	22.4	160.4	188.3
2011	136.4	27.9	183.6	236.4	0	0	0	0	12.1	3.6	50	281.7
2012	91.2	136.6	146	108.1	20.4	0	0	0	26.9	60.5	87	116.2
2013	21	153.2	205.7	49.1	24.3	0	0	2.8	5.2	85.4	14.1	97.8
2014	132.8	137.6	193.9	55.1	45.9	10.4	0	0	27.1	23.3	56.2	166.9
2015	170	121.5	231.8	50.6	81.8	1.2	1.3	0	0	52.3	52.1	92.9
2016	25.8	176.6	134	92	7.7	0	0	0	35.1	51	6.8	108.2
2017	138.5	175.7	331.4	132.1	29.5	2.3	0	0	4.2	67.9	23	96.8
2018	155.6	94.4	182.6	145.1	78.4	0	0	0	5.5	35.3	49.5	78.0

Fuente: SENAMHI.

Tabla 11. Datos completados estación Buena Vista.

ESTACIÓN BUENA VISTA PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación: BUENA VISTA			Latit.: -9.43			Elevación: 419 msnm						
Serie histórica: 1998 - 2018			Long.: -78.21			Departamento: Ancash						
Código de estación: 435			Tipo: Climática			Cuenca: Casma						
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	0	6.4	7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1999	0	15.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	2.8	0	0	0	0	0	0	0	5.3	2.3	0
2003	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0
2004	0.5	0.6	1.5	0	0	0	0	0	0	1.7	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.5	0
2009	15.5	0	0	1.2	0	0	0	0	0	1.5	0	0
2010	0	4	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	2	41	0	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0.7	13.2	14.6	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5
2014	0	1.2	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	1.6	5	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	69.4	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9
2018	1.7	2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	1.1

Fuente: SENAMHI.

4.1.4. Análisis de consistencia de datos método de la curva doble masa.

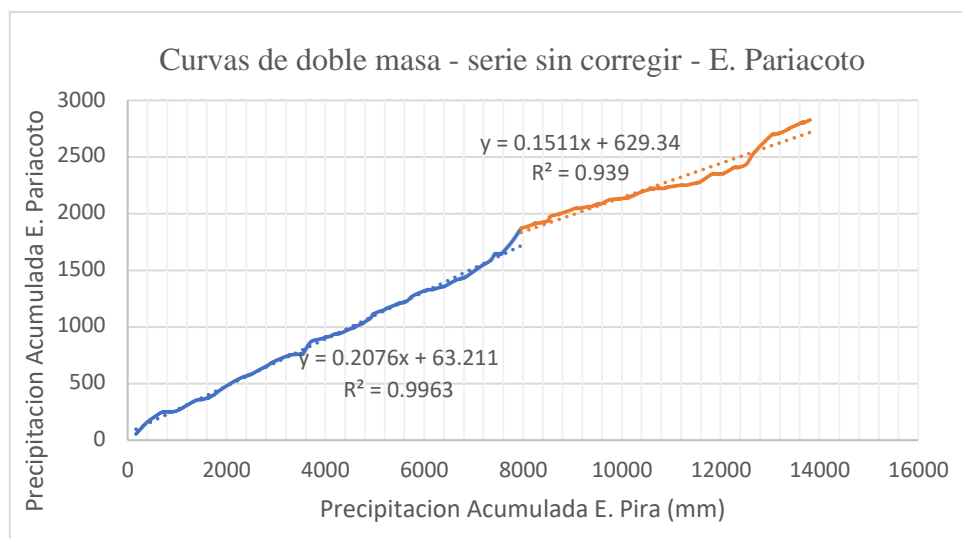
Una vez realizada la completación de datos de los registros de precipitación mensual de cada estación, se realizó la corrección de la serie histórica de datos para las estaciones de Pariacoto, Cajamarquilla y Yungay que según la prueba de T-student y el test de Mann Kendall no tienen registros homogéneos y/o consistentes, para lo cual aplicamos el método de la curva doble masa.

Finalmente, se realizó la comprobación de la corrección de datos aplicando nuevamente las pruebas estadísticas mencionadas.

a) Corrección de inconsistencias método curva doble masa: Estación Pariacoto.

a.1) Elaboración de curva doble masa serie sin corregir: estación Pariacoto.

Figura 4. Curva doble masa serie sin corregir estación Pariacoto.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 04 obtenemos:

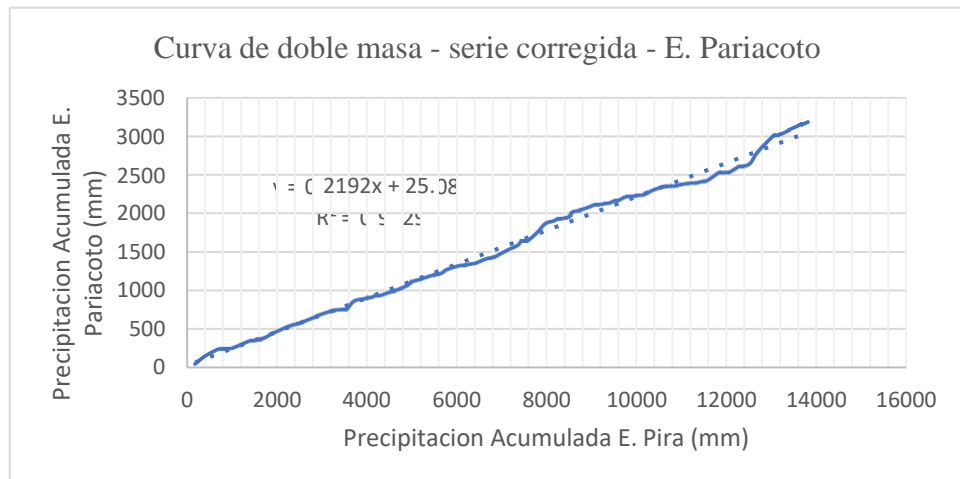
m1 : 0.2076

m2 : 0.1511

K : 1.3739

a.2) Corrección de datos método curva doble masa: Estación Pariacoto.

Figura 5. Curva doble masa serie corregida estación Pariacoto.



Fuente: Elaboración propia.

a.3) Prueba de medias con t-student: serie corregida.

Ho: M1=M2 Las medias son estadísticamente iguales.

H1: M1≠M2 Las medias no son estadísticamente iguales.

Nivel de confianza : 95%

Grados de libertad : 250

Tabla 12. Resultados prueba de medias t-student estación Pariacoto.

X1	X2	S1	S2	n1	n2	S	Tc	Tα/2
17.143	11.918	29.258	28.855	12	240	28.873	0.6118	1.9695

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor de “Tc” calculado es menor a “T” de tabla, se acepta Ho y se concluye que las medias son estadísticamente iguales, por lo que los datos ahora son consistentes.

Figura 6. Serie histórica estación Pariacoto serie corregida y no corregida.

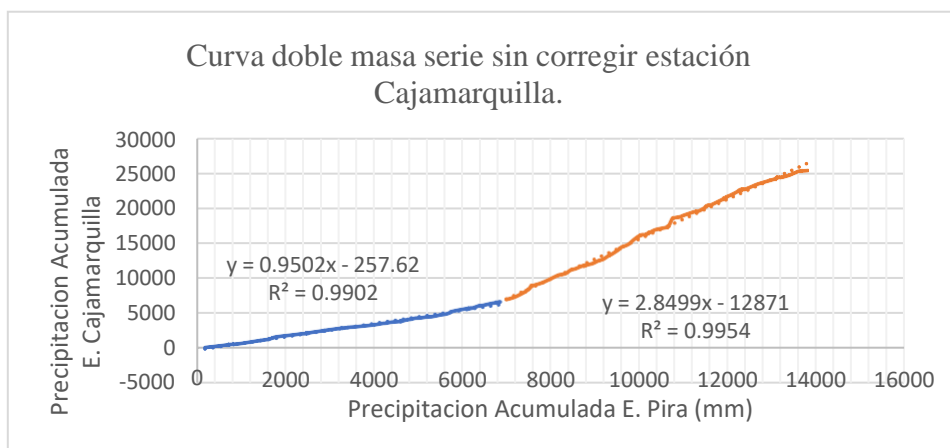


Fuente: Elaboración propia.

b) Corrección de inconsistencias método curva doble masa: Estación Cajamarquilla.

b.1) Elaboración de curva doble masa serie sin corregir: estación Cajamarquilla.

Figura 7. Curva doble masa serie sin corregir estación Cajamarquilla.



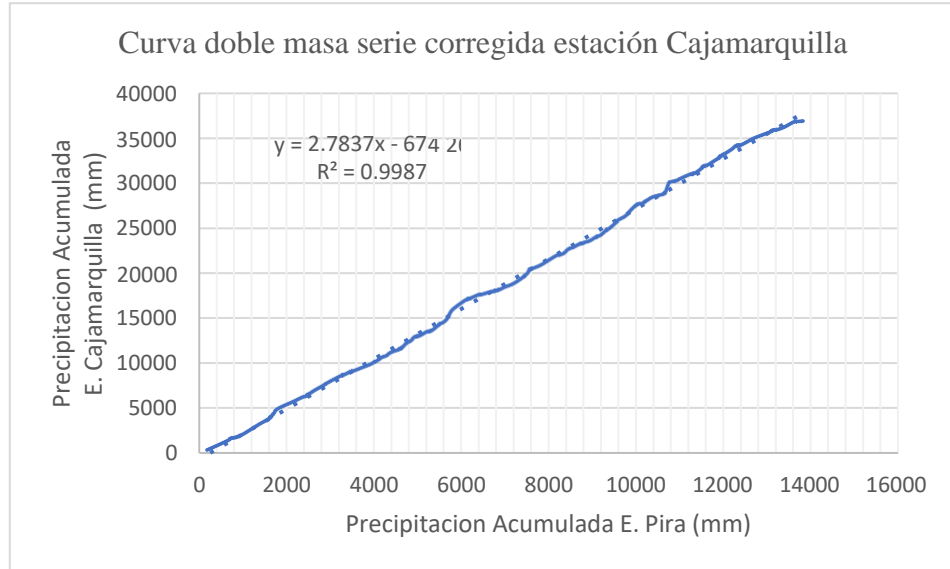
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 07 obtenemos:

- m1 : 2.8499
- m2 : 0.9502
- K : 2.9993

b.2) Corrección de datos método curva doble masa: Estación Cajamarquilla.

Figura 8. Curva doble masa serie corregida estación Cajamarquilla.



Fuente: Elaboración propia.

b.3) Prueba de medias con t-student: serie corregida.

Ho: $M1=M2$ Las medias son estadísticamente iguales.

H1: $M1 \neq M2$ Las medias no son estadísticamente iguales.

Nivel de confianza : 95%

Grados de libertad : 250

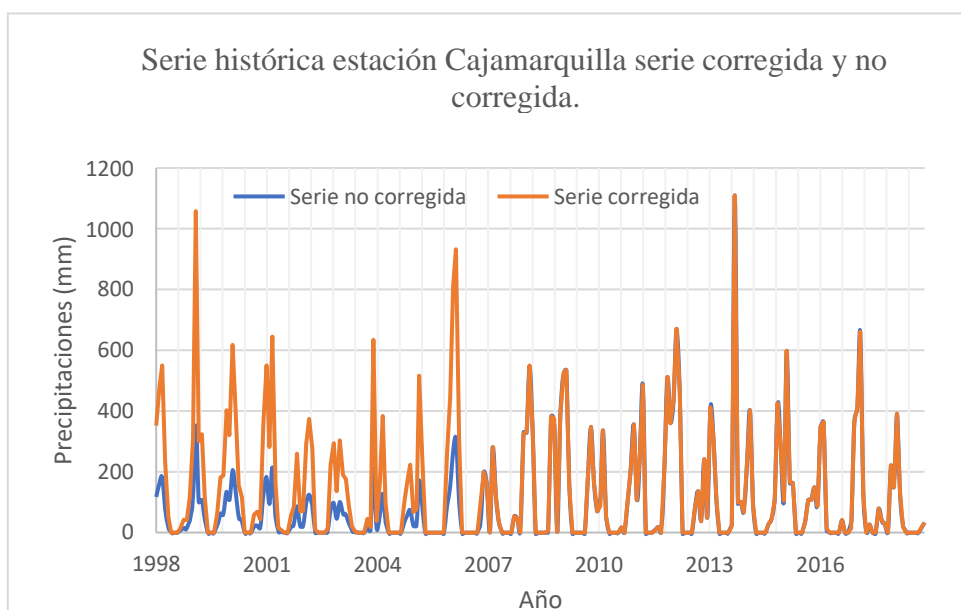
Tabla 13. Resultados prueba de medias t-student estación Cajamarquilla.

X1	X2	S1	S2	n1	n2	S	Tc	$T\alpha/2$
161.01	135.5	215.01	188.78	107	145	200.33	0.999	1.9695

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor de “Tc” calculado es menor a “ $T\alpha/2$ ” de tabla, se acepta Ho y se concluye que las medias son estadísticamente iguales, por lo que los datos son consistentes.

Figura 9. Serie histórica estación Cajamarquilla serie corregida y no corregida.

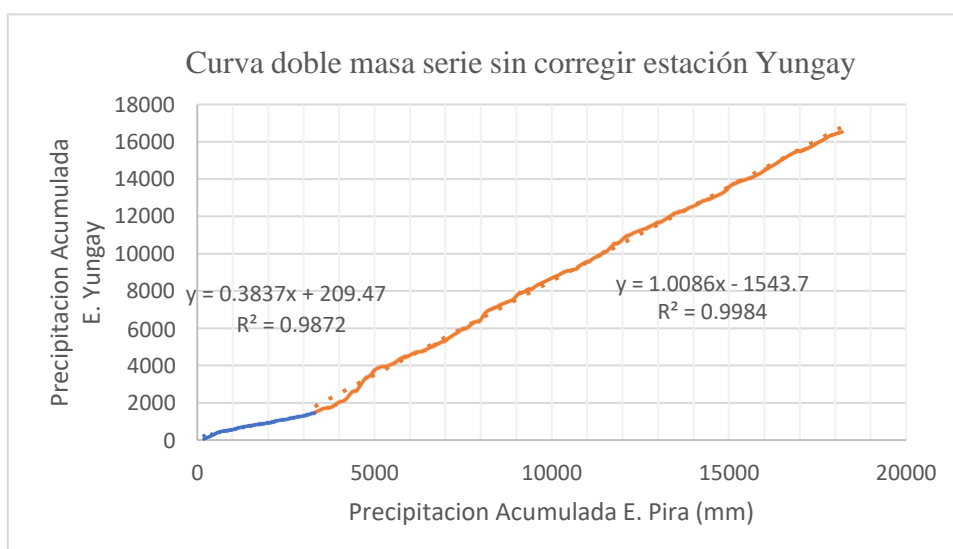


Fuente: Elaboración propia.

c) Corrección de inconsistencias método curva doble masa: Estación Yungay.

c.1) Elaboración de curva doble masa serie sin corregir: estación Yungay.

Figura 10. Curva doble masa serie sin corregir estación Yungay.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 10 obtenemos:

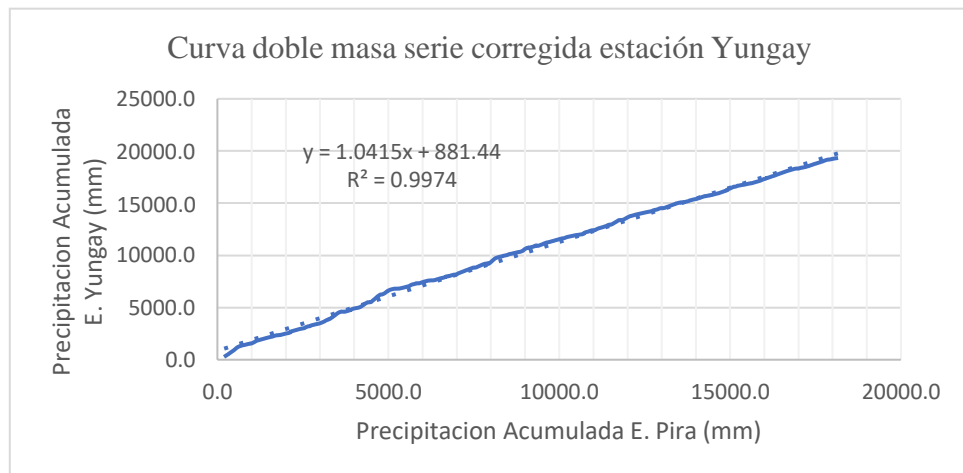
m1 : 1.008

m2 : 0.383

K : 2.620

c.2) Corrección de datos método curva doble masa: Estación Yungay.

Figura 11. Curva doble masa serie corregida estación Yungay.



Fuente: Elaboración propia.

c.3) Prueba de medias con t-student: serie corregida.

Ho: M1=M2 Las medias son estadísticamente iguales.

H1: M1≠M2 Las medias no son estadísticamente iguales.

Nivel de confianza : 95%

Grados de libertad : 250

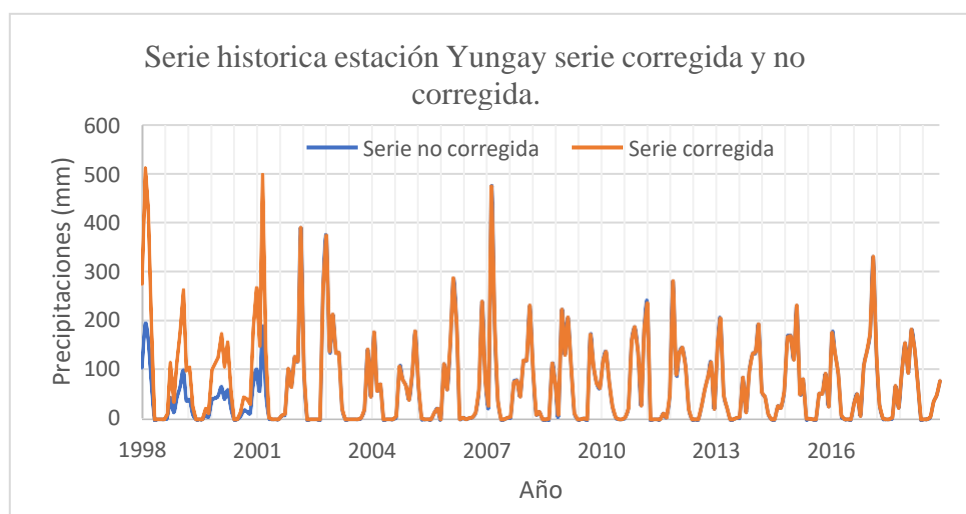
Tabla 14. Resultados prueba de medias t-student estación Yungay.

X1	X2	S1	S2	n1	n2	S	Tc	Tα/2
104.22	71.86	120.52	88.615	38	214	94.023	1.950	1.9695

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor de “Tc” calculado es menor a “Tα/2” de tabla, se acepta Ho y se concluye que las medias son estadísticamente iguales, por lo que los datos son consistentes.

Figura 12. Serie histórica estación Yungay serie corregida y no corregida.



Fuente: Elaboración propia.

d) Prueba de homogeneidad y consistencia de estaciones meteorológicas con series de datos corregidas.

Se realizó nuevamente la prueba de T-student y el test de Mann Kendall para los registros de datos corregidos de las estaciones meteorológicas.

Tabla 15. Prueba de homogeneidad de datos series históricas corregidas.

Estación	Prueba T-student (NC = 95%)			Prueba de Mann Kendall (NC = 95%)		
	T $\alpha/2$	T c	Conclusión	V $\alpha/2$	V c	Conclusión
Buena Vista Alta	1.969	-1.800	Consistente	1.96	0.829	Homogénea
Pira	1.969	1.018	Consistente	1.96	-1.129	Homogénea
Pariacoto	1.969	0.611	Consistente	1.96	-1.788	Homogénea
Chacchan	1.969	0.321	Consistente	1.96	-1.88	Homogénea
Cajamarquilla	1.969	0.999	Consistente	1.96	-1.674	Homogénea
UNASAM	1.969	0.048	Consistente	1.96	-0.327	Homogénea
Yungay	1.969	1.950	Consistente	1.96	0.299	Homogénea

Fuente: Elaboración propia

Según se muestra en la Tabla 15. Prueba de homogeneidad de datos series históricas corregidas., después de las correcciones con el método de curva doble masa, los registros de precipitación ahora son consistentes.

4.1.5. Estimación de valores medios de precipitación cuenca Casma.

Para obtener la precipitación media mensual representativa de la cuenca Casma, se aplicó el método de interpolación IDW.

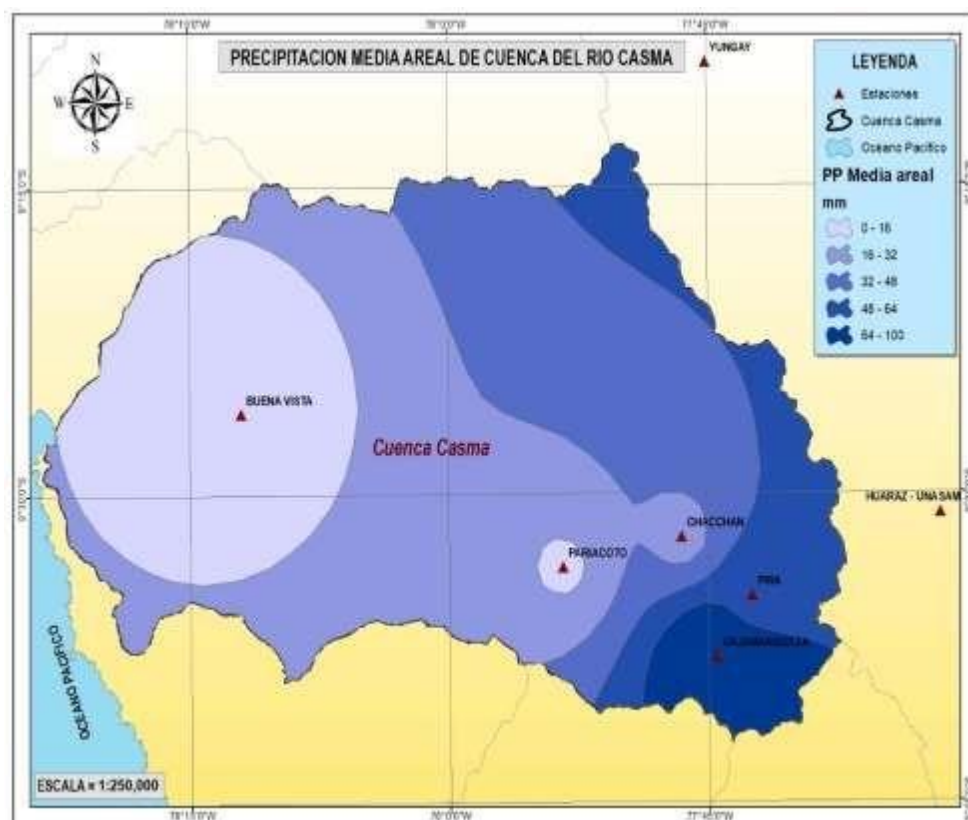
Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 16. Resultados valores medios mensuales de la cuenca Casma. y la Figura 13. Precipitación media mensual areal de la cuenca Casma.

Tabla 16. Resultados valores medios mensuales de la cuenca Casma.

PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DE LA CUENCA CASMA												
PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL												
Nombre de estación:	N/A			Latit.:	N/A			Elevación:	N/A			
Serie histórica:	1998 - 2018			Long.:	N/A			Región:	Ancash			
Código de estación:	N/A			Tipo:	N/A			Cuenca:	Casma			
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	113.6	163.3	164.4	53.7	7.2	2.5	0.0	0.0	6.9	33.2	10.9	37.3
1999	74.1	238.1	63.0	66.7	21.0	0.4	0.4	0.1	13.0	25.6	38.5	66.7
2000	71.1	150.3	97.1	50.5	23.8	0.1	0.3	2.4	12.4	14.7	13.0	86.1
2001	127.2	67.1	161.0	44.5	5.9	1.0	0.2	0.1	13.6	17.2	57.3	22.1
2002	25.2	101.8	109.4	57.7	2.6	0.1	0.1	0.0	4.3	58.9	78.8	38.7
2003	62.9	49.8	56.0	20.0	3.6	0.7	0.2	0.1	0.3	12.4	6.6	111.5
2004	13.9	47.2	64.9	34.8	1.2	0.4	0.6	0.0	4.9	33.5	38.2	47.1
2005	24.4	29.4	101.2	37.3	0.6	0.0	0.0	0.4	1.2	5.5	1.6	57.4
2006	73.7	123.8	183.5	71.9	0.4	0.9	0.2	0.4	1.4	6.5	25.9	61.0
2007	42.5	16.1	112.6	55.6	9.7	0.3	0.3	0.3	0.7	21.2	17.3	12.1
2008	88.0	92.4	127.2	70.6	0.7	1.6	0.4	0.1	1.7	72.6	51.9	7.0
2009	128.9	135.0	118.7	55.6	5.3	0.4	0.0	1.1	0.3	50.2	65.2	54.7
2010	37.5	35.8	69.7	18.9	5.3	0.7	0.0	0.2	4.1	5.8	29.9	72.1
2011	84.0	24.5	63.3	88.2	0.3	0.0	0.3	1.0	3.9	2.5	40.7	110.3
2012	60.2	111.6	114.8	83.3	2.9	0.4	0.0	0.0	15.1	24.9	27.0	48.6
2013	13.5	104.5	107.2	18.9	3.6	0.0	0.0	0.4	4.1	136.3	17.6	40.5
2014	31.0	64.1	100.5	24.5	8.9	0.9	0.3	0.2	7.1	12.5	25.1	86.2
2015	55.8	43.7	132.1	35.0	27.3	0.2	0.7	0.0	5.2	22.9	22.6	38.0
2016	17.7	81.5	70.2	14.1	1.1	0.2	0.0	0.0	10.1	5.2	0.8	18.5
2017	95.8	114.0	259.3	31.5	7.0	3.2	0.0	0.1	11.8	17.6	10.3	17.3
2018	72.8	43.3	92.7	40.5	14.0	0.1	0.0	0.2	1.6	6.0	16.4	27.8

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Precipitación media mensual areal de la cuenca Casma.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Precipitación media mensual del Satélite TRMM 3B43.

Los registros de precipitación del satélite TRMM 3B43, para la cuenca Casma se muestran a continuación en la Tabla 17. Precipitación media mensual TRMM 3B43 para la cuenca Casma.

Tabla 17. Precipitación media mensual TRMM 3B43 para la cuenca Casma.

DATOS SATELITALES TRRM CUENCA CASMA PRECIPITACION MENSUAL												
Nombre de estación:	N/A		Latit:	9.0 -10.0		Elevación:	N/A					
Serie histórica:	1998 - 2018		Long.:	77.25-78.25		Región:	Ancash					
Código de estación:	N/A		Tipo:	N/A		Cuenca:	Casma					
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1998	179.8	179.2	206.0	99.3	39.0	20.0	8.0	14.0	33.1	125.7	31.7	43.3

1999	114.0	151.3	127.8	88.2	43.3	23.0	21.5	11.2	31.8	29.5	64.6	65.6
2000	58.6	149.4	126.4	74.6	62.3	22.1	15.9	28.7	29.3	29.8	21.3	146.7
2001	169.3	105.8	199.7	52.6	39.5	16.4	19.3	3.0	59.8	42.5	95.9	50.6
2002	72.8	93.3	162.7	61.5	43.3	22.7	17.4	33.9	27.3	56.0	104.5	105.5
2003	88.8	97.1	141.6	61.9	47.1	23.6	10.2	10.2	27.5	35.6	41.4	62.1
2004	47.6	103.1	120.0	62.4	31.2	2.6	23.8	31.3	41.6	69.2	78.2	78.0
2005	75.0	74.2	149.1	52.3	22.9	26.1	32.2	12.5	44.4	31.5	37.2	81.3
2006	84.5	84.4	174.8	115.8	33.4	25.3	8.9	28.1	48.0	50.7	64.9	101.8
2007	56.1	63.3	155.2	49.6	11.9	25.5	24.4	15.7	31.7	33.4	72.0	57.7
2008	110.9	78.1	78.0	50.2	33.6	51.6	20.5	10.6	77.8	57.3	49.0	40.5
2009	110.7	52.6	131.7	95.3	19.9	50.3	5.2	22.5	24.8	50.6	41.3	56.6
2010	62.9	49.4	74.1	23.1	19.8	18.8	5.9	21.3	15.6	28.3	28.5	37.8
2011	48.6	57.6	81.9	62.5	32.4	13.9	29.4	11.5	27.0	53.3	55.9	73.8
2012	79.4	108.6	159.8	64.2	63.9	38.1	43.4	27.1	39.2	59.4	20.2	46.9
2013	66.0	92.2	70.7	30.6	20.0	32.9	9.9	17.9	26.2	65.1	25.7	67.9
2014	60.7	101.9	125.8	65.3	44.9	40.1	13.6	13.5	23.6	42.3	49.8	63.1
2015	58.8	77.3	105.6	45.1	65.8	12.1	26.7	15.8	22.0	24.2	34.5	97.9
2016	50.5	97.5	114.7	33.4	14.4	12.8	11.1	9.2	17.0	25.7	26.9	127.4
2017	93.1	83.4	180.1	37.9	31.3	14.6	16.0	13.8	23.2	56.9	33.3	58.5
2018	93.9	74.3	177.5	71.5	52.7	21.5	16.5	22.2	9.0	34.7	54.7	84.3

Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

4.1.7. Análisis de datos de precipitación media mensual TRMM 3B43.

Para determinar si los datos de precipitación mensual generados por el satélite TRMM-3B43 son consistentes y homogéneos, se aplicó la prueba de medias de T-student y la prueba de homogeneidad de Mann Kendall, los resultados se muestran en la Tabla 18. Prueba de consistencia y homogeneidad de datos TRMM 3B43.

Tabla 18. Prueba de consistencia y homogeneidad de datos TRMM 3B43.

Estación	Prueba T-student (NC = 95%)			Prueba de Mann Kendall (NC = 95%)		
	Ta/2	Tc	Conclusión	Va/2	Vc	Conclusión
Satélite TRMM	1.969	2.154	Inconsistente	1.96	-2.07	No Homogénea

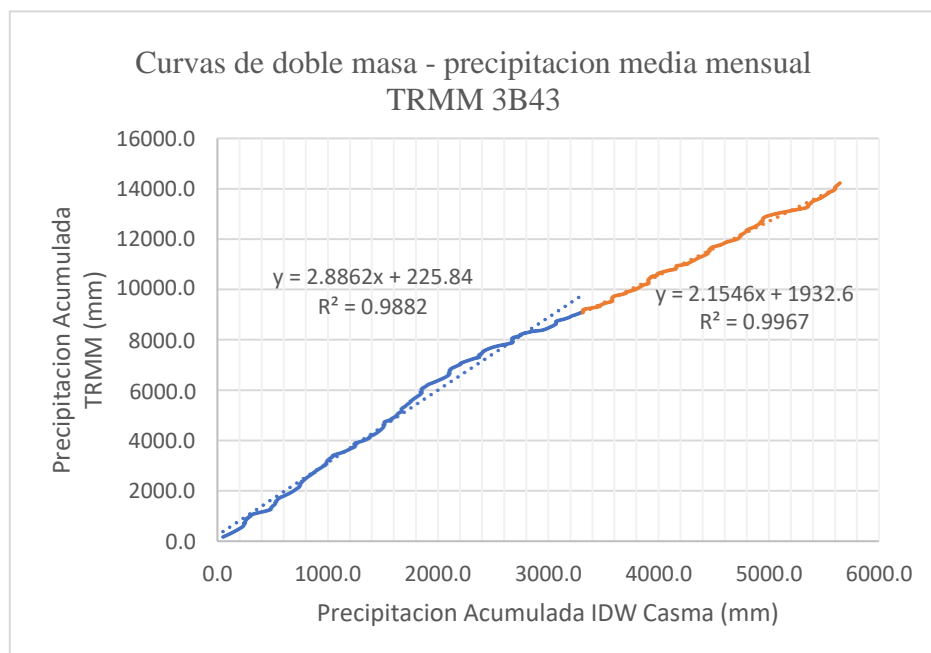
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 18, según el test de Mann Kendall y la prueba T-student con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$), se tiene que la serie de datos estimados de precipitación del satélite TRMM 3B43 para la cuenca Casma, son inconsistentes y no homogéneos, por lo que requieren corrección.

a) Corrección de datos del satélite TRMM 3B43 para la cuenca Casma.

a.1) Elaboración de curva doble masa serie sin corregir: TRMM 3B43.

Figura 14. Curva doble masa precipitación media mensual del TRMM 3B43.



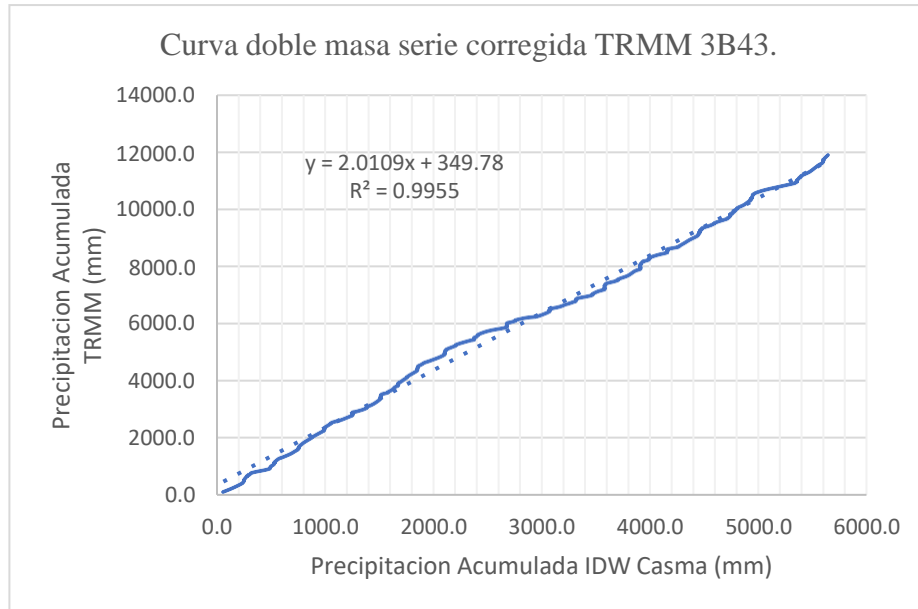
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 14 obtenemos:

- m1 : 2.1546
- m2 : 2.8862
- K : 0.7465

a.2) Corrección de datos método curva doble masa: TRMM 3B43.

Figura 15. Curva doble masa serie corregida TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

a.3) Prueba de medias con t-student: serie corregida.

Ho: $M_1 = M_2$ Las medias son estadísticamente iguales.

H1: $M_1 \neq M_2$ Las medias no son estadísticamente iguales.

Nivel de confianza : 95%

Grados de libertad : 250

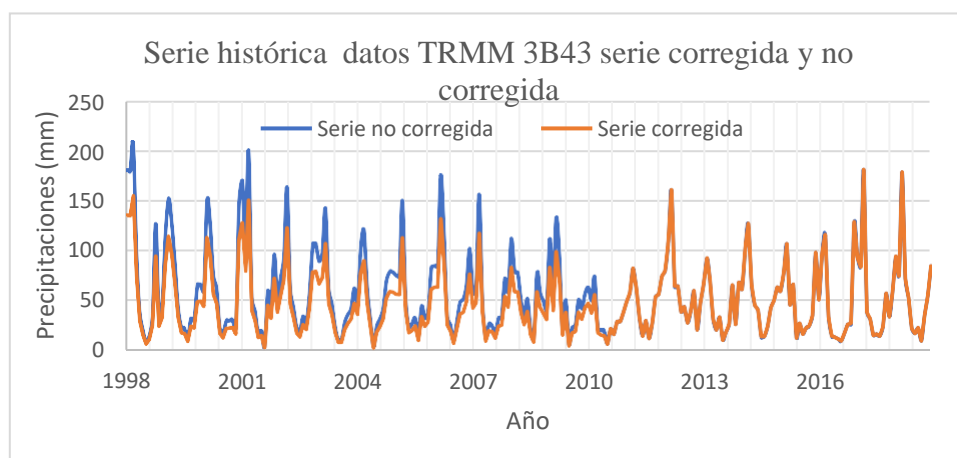
Tabla 19. Resultados prueba de medias t-student TRMM 3B43 corregido.

X1	X2	S1	S2	n1	n2	S	Tc	Tα/2
45.443	49.867	33.462	36.251	150	102	34.616	-0.996	1.9695

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor de “Tc” calculado es menor a “Tα/2” de tabla, se acepta Ho y se concluye que las medias son estadísticamente iguales, por lo que los datos son consistentes.

Figura 16. Serie histórica datos TRMM serie corregida y no corregida.



Fuente: Elaboración propia.

a.4) Prueba de homogeneidad y consistencia TRMM 3B43 con serie de datos corregida.

Tabla 20. Prueba de homogeneidad y consistencia TRMM 3B43 corregido.

Estación	Prueba T-student (NC = 95%)			Prueba de Mann Kendall (NC = 95%)		
	T $\alpha/2$	Tc	Conclusión	V $\alpha/2$	Vc	Conclusión
Satélite TRMM	1.969	-0.996	Consistente	1.96	0.276	Homogénea

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar después de la corrección de datos, según el test de Mann Kendall y la prueba T-student con un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0.05$), la serie de datos estimados de precipitación del satélite TRMM 3B43 para la cuenca Casma es homogénea y consistente.

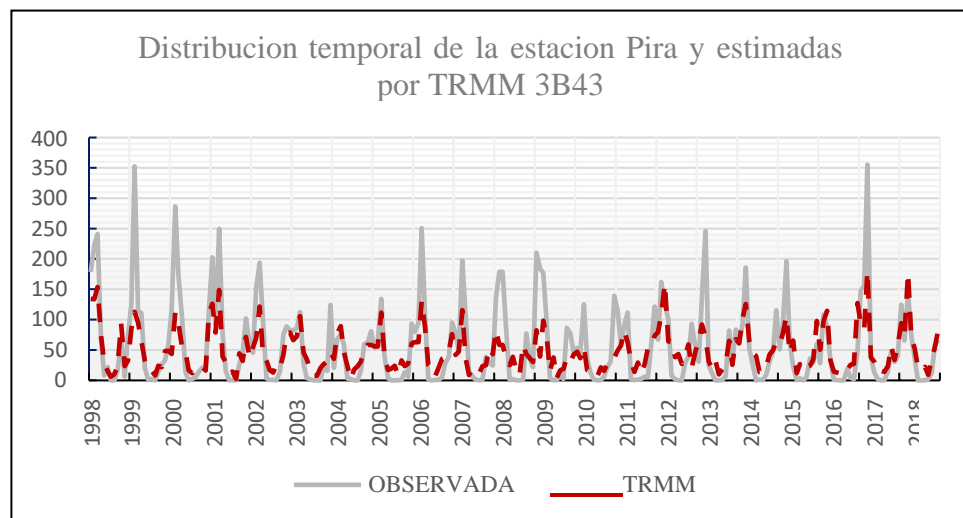
4.1.8. Comparación de series históricas de estaciones y TRMM 3B43.

a) Comparación de serie histórica estación Pira y TRMM.

Se puede apreciar en **Figura 17.** Distribución temporal Pira y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Pira presenta un comportamiento bastante similar al registro de precipitaciones

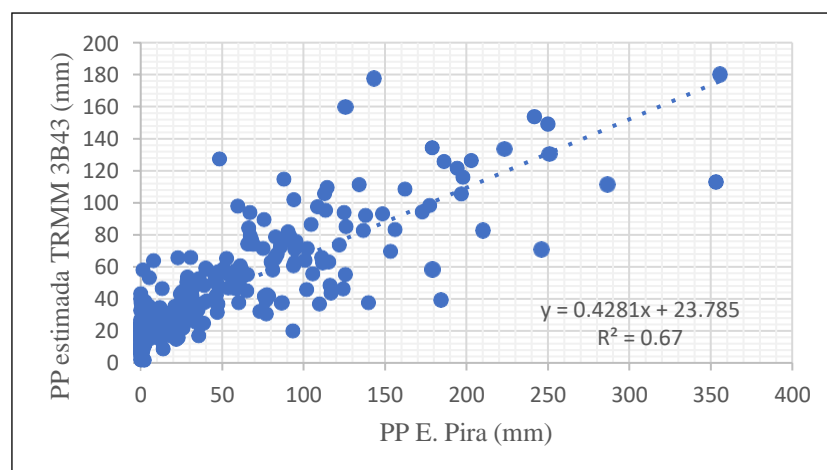
estimado por el satélite TRMM 3B43, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrados en la **Figura 18**. Diagrama de dispersión estación Pira y TRMM 3B43. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.67, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio” y una correlación de 0.82, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “muy alto”.

Figura 17. Distribución temporal Pira y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Diagrama de dispersión estación Pira y TRMM 3B43.



Coefficiente de determinación R ² :	de	0.67	Coefficiente de correlación R:	de	0.82
--	----	------	--------------------------------	----	------

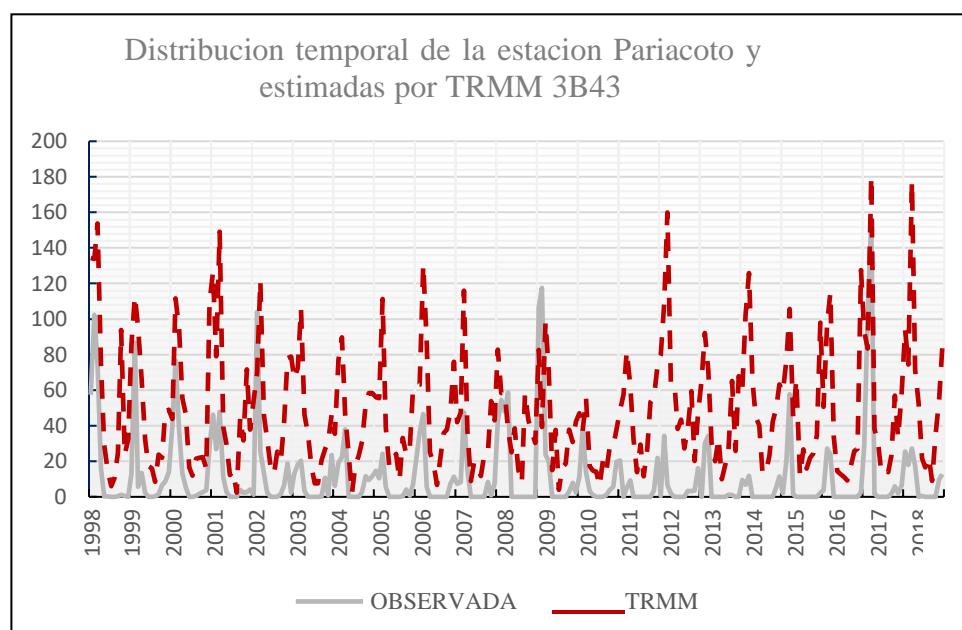
Fuente: Elaboración propia.

b) Comparación de serie histórica estación Pariacoto y TRMM.

Se puede apreciar en la **Figura 19**. Distribución temporal estación Pariacoto y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Pariacoto presenta un comportamiento similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, aunque con precipitaciones menores pero que siguen un patrón de comportamiento similar al TRMM.

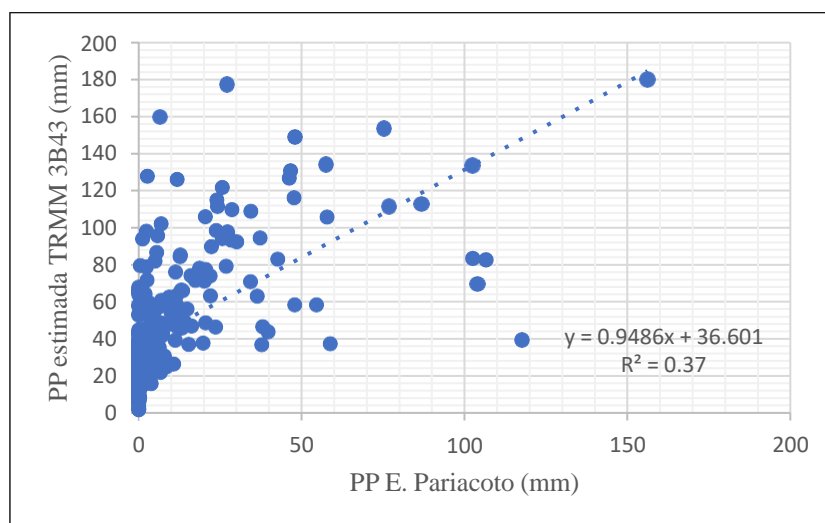
Dicha estación en su diagrama de dispersión mostrado en la **Figura 20**. Diagrama de dispersión estación Pariacoto y TRMM 3B43. Obtuvo un coeficiente de determinación de 0.31, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “insatisfactorio” y una correlación de 0.61, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “alto”.

Figura 19. Distribución temporal estación Pariacoto y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Diagrama de dispersión estación Pariacoto y TRMM 3B43.



Coefficiente de determinación R ² :	de	0.37	Coefficiente de correlación R:	de	0.61
--	----	------	--------------------------------	----	------

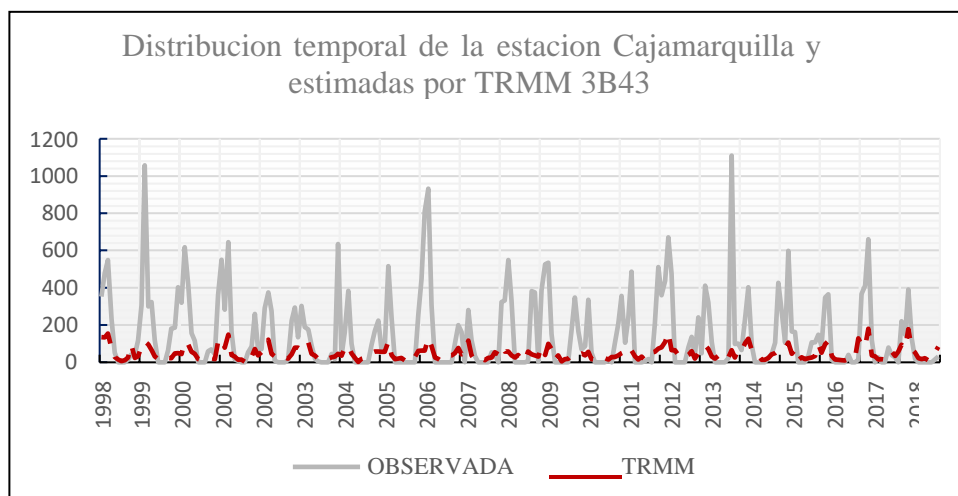
Fuente: Elaboración propia.

c) Comparación de serie histórica estación Cajamarquilla y TRMM.

Se puede apreciar en la **Figura 21.** Distribución temporal estación Cajamarquilla y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Cajamarquilla presenta un comportamiento similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, siguiendo el mismo patrón, pero con picos de precipitaciones más altas, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrados en la **Figura 22.** Diagrama de dispersión estación Cajamarquilla y TRMM 3B43.

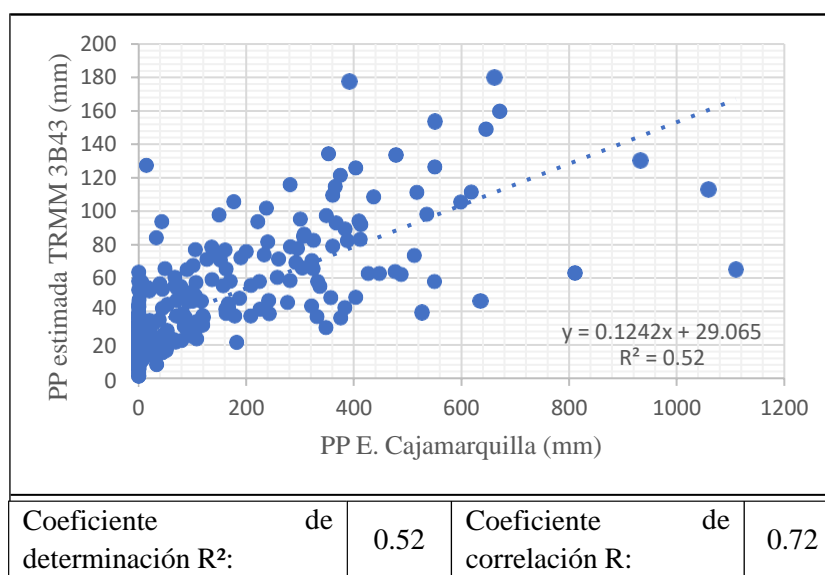
Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.52, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “insatisfactorio” y una correlación de 0.72, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “alto”.

Figura 21. Distribución temporal estación Cajamarquilla y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Diagrama de dispersión estación Cajamarquilla y TRMM 3B43.



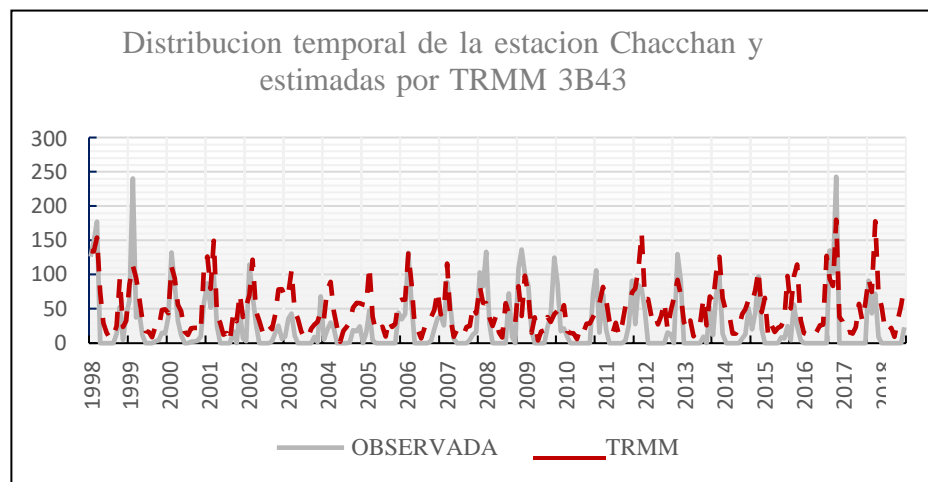
Fuente: Elaboración propia.

d) Comparación de serie histórica estación Chacchan y TRMM.

Se puede apreciar en la **Figura 23.** Distribución temporal estación Chacchan y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Chacchan presenta un comportamiento similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, ya que se observa el mismo patrón en el comportamiento de las precipitaciones en los meses de

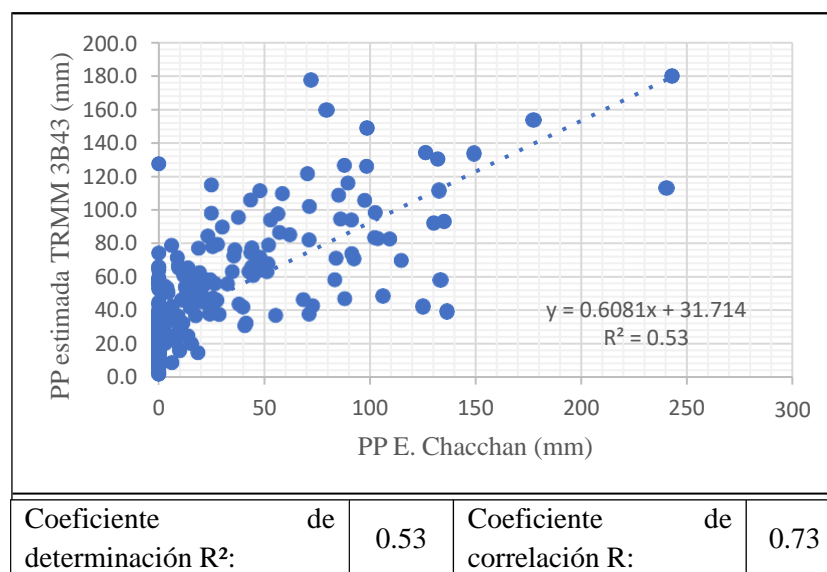
avenidas, sin embargo se observan mayores precipitaciones que los meses de estiaje, por lo que los resultados de su diagrama de dispersión mostrados en la **Figura 24**. Diagrama de dispersión estación Chacchan y TRMM 3B43. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.53, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio” y una correlación de 0.73, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “alto”.

Figura 23. Distribución temporal estación Chacchan y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Diagrama de dispersión estación Chacchan y TRMM 3B43.

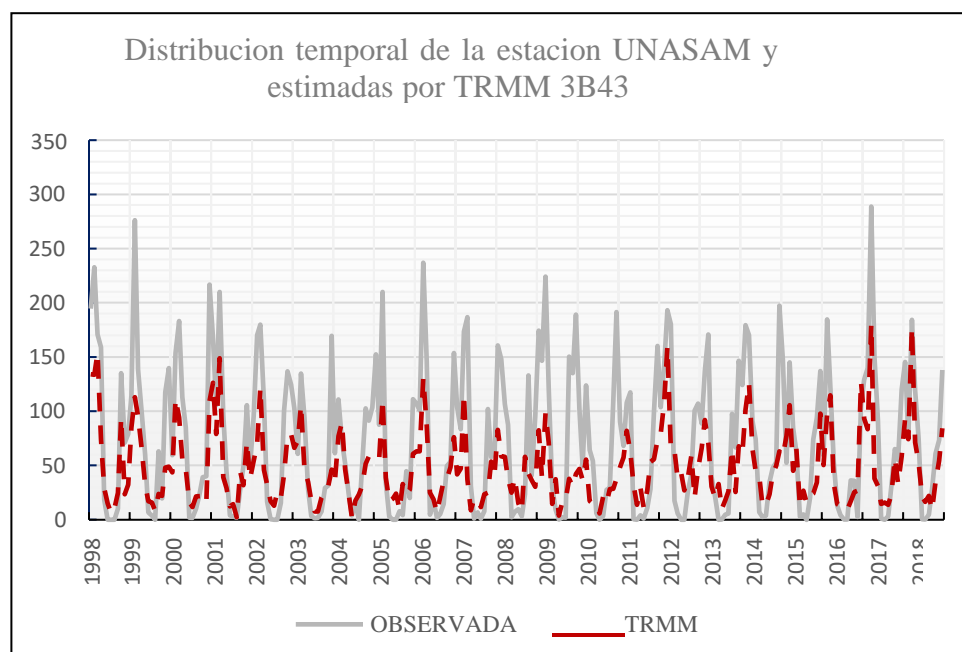


Fuente: Elaboración propia.

e) **Comparación de serie histórica estación UNASAM y TRMM.**

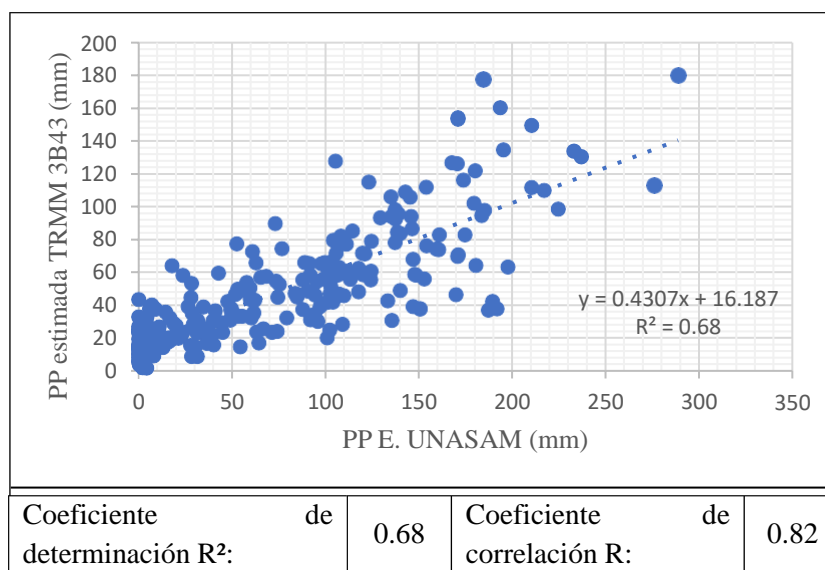
Se puede apreciar en la **Figura 25**. Distribución temporal estación UNASAM y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación UNASAM presenta un comportamiento bastante similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrados en la **Figura 26**. Diagrama de dispersión estación UNASAM y TRMM 3B43. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.68, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio” y una correlación de 0.82, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “muy alto”.

Figura 25. Distribución temporal estación UNASAM y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Diagrama de dispersión estación UNASAM y TRMM 3B43.

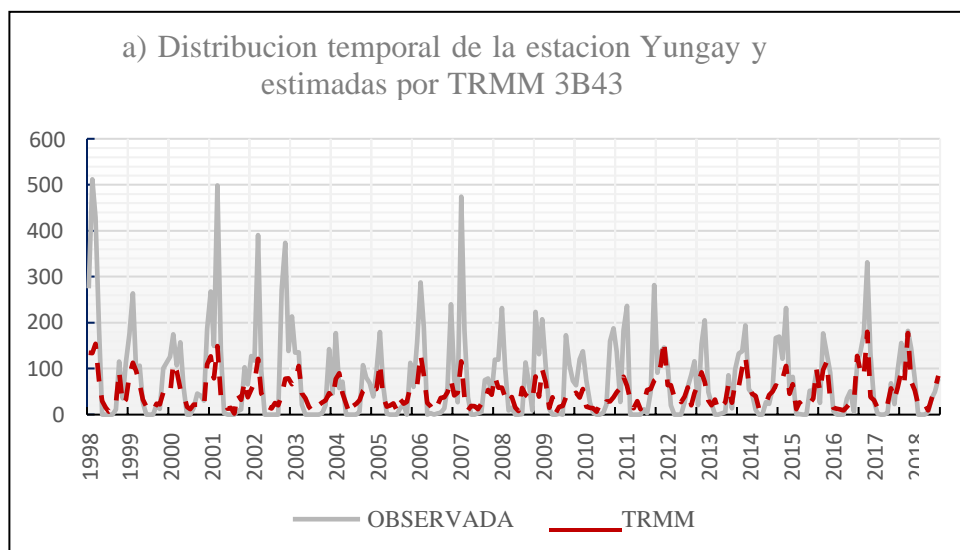


Fuente: Elaboración propia.

f) Comparación de serie histórica estación Yungay y TRMM.

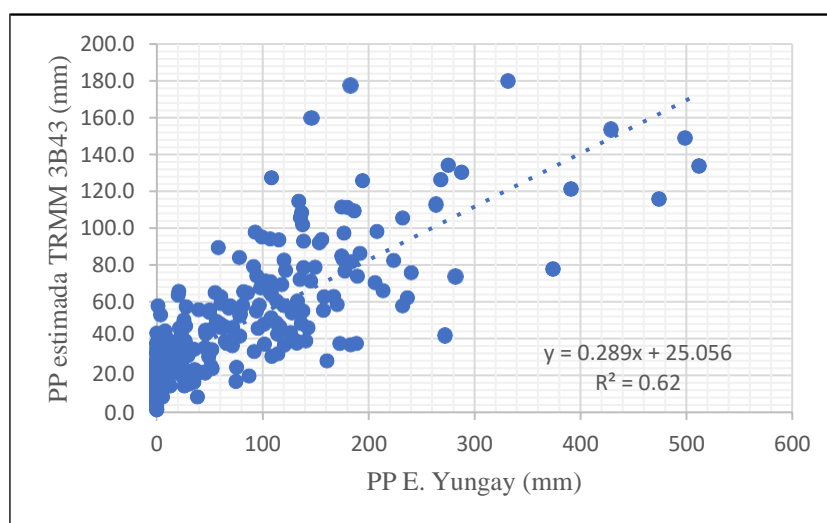
Se puede apreciar en la **Figura 27.** Distribución temporal estación Yungay y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Yungay presenta un comportamiento similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, siguiendo el mismo patrón, pero con picos de precipitaciones más altas, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrador en la **Figura 28.** Diagrama de dispersión estación Yungay y TRMM 3B43. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.72, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio” y una correlación de 0.79, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “muy alto”.

Figura 27. Distribución temporal estación Yungay y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Diagrama de dispersión estación Yungay y TRMM 3B43.



Coefficiente de determinación R ² :	de	0.62	Coefficiente de correlación R:	de	0.79
--	----	------	--------------------------------	----	------

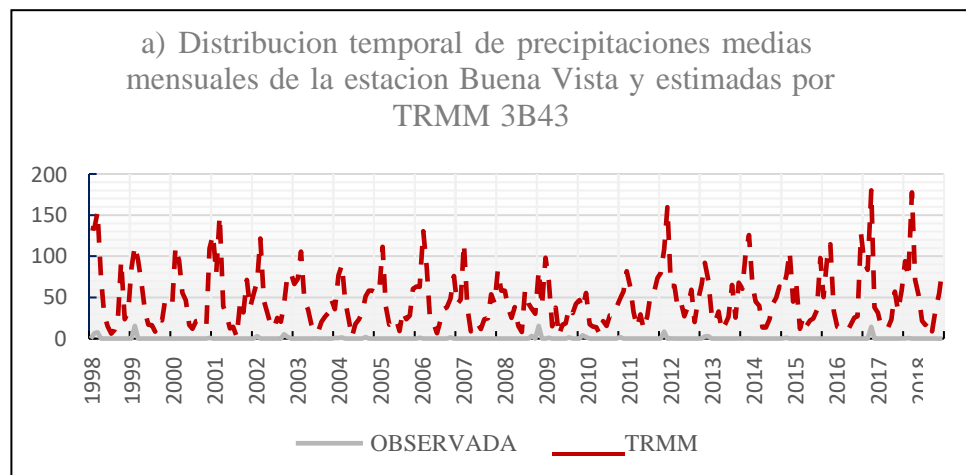
Fuente: Elaboración propia.

g) Comparación de serie histórica estación Buena Vista y TRMM.

Se puede apreciar en la **Figura 29.** Distribución temporal estación Buena Vista y TRMM 3B43. Que la serie histórica de precipitaciones registradas por la estación Buena Vista presenta un comportamiento poco similar al registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, ya que en

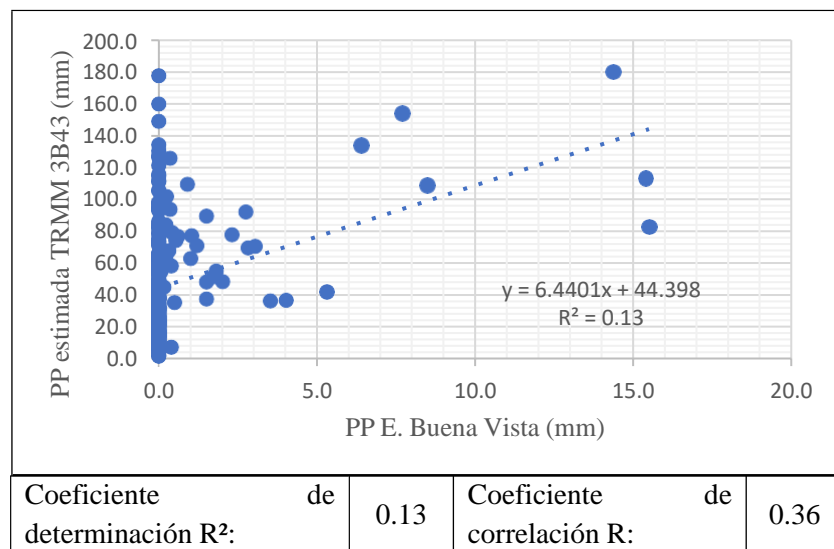
este caso se observan sobreestimaciones de la precipitación, tanto en los meses de estiaje como los meses de avenidas, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrador en la **Figura 30**. Diagrama de dispersión estación Buena Vista y TRMM 3B43. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.13, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “insatisfactorio” y una correlación de 0.36, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “bajo”.

Figura 29. Distribución temporal estación Buena Vista y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Diagrama de dispersión estación Buena Vista y TRMM 3B43.

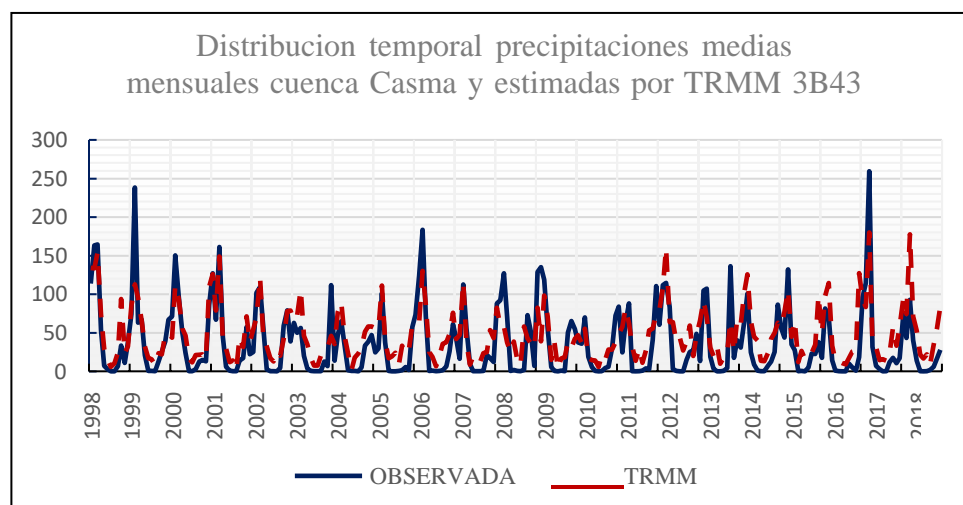


Fuente: Elaboración propia.

4.1.9. COMPARACIÓN PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES CUENCA CASMA Y TRMM 3B43.

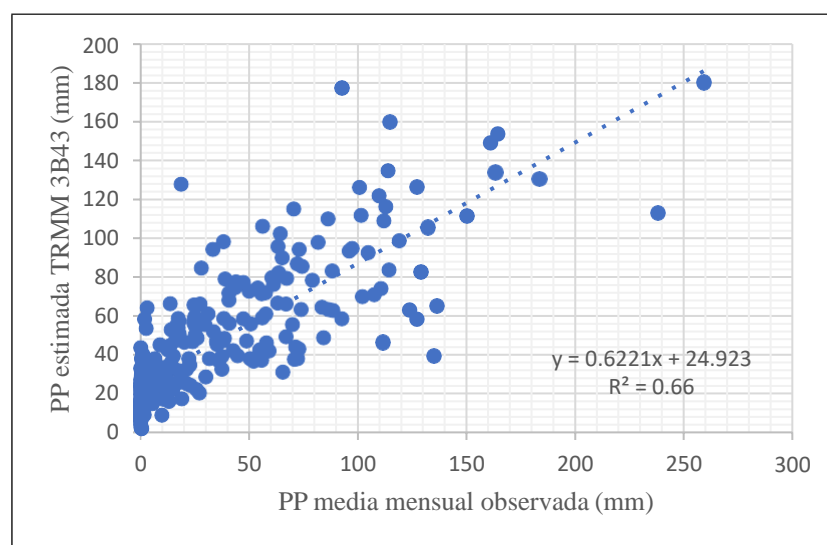
Se puede apreciar en la **Figura 31**. Distribución temporal precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43., que la serie histórica de precipitaciones medias mensuales representativas de la cuenca Casma presentan gran similitud en su comportamiento con el registro de precipitaciones estimado por el satélite TRMM 3B43, tal es así que los resultados de su diagrama de dispersión mostrado en la **Figura 32**. Diagrama de dispersión de precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43., Muestran un coeficiente de determinación de 0.66, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio”, una correlación de 0.82, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “muy alto”, una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.60 el cual según la clasificación de (Cabrera, 2009) es “muy bueno” y un sesgo porcentual de BIAS de 31.71%.

Figura 31. Distribución temporal precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Diagrama de dispersión de precipitaciones medias mensuales cuenca Casma y TRMM 3B43.



Coefficiente de determinación R ² :	0.66	Coefficiente de correlación R:	0.82
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):	0.60	Sesgo porcentual (BIAS) (%):	31.71

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Discusión de resultados

Se realizó el análisis comparativo de datos de precipitación mensualizada para cada estación meteorológica de la cuenca Casma y la estimada por el satélite TRMM-3B43, para un registro histórico comprendido desde enero del 1998 hasta diciembre del 2018, obteniendo coeficientes de correlación “muy altos” para las estaciones de Pira, UNASAM y Yungay y “altos” para las estaciones de Pariacoto, Cajamarquilla y Chacchan, además de coeficientes de determinación que varían desde 0.37 a 0.68 siendo resultados satisfactorios. Similares resultados fueron obtenidos por (Lujano et al., 2015) en su estudio de la cuenca Ramis, donde obtuvo coeficientes de determinación de 0.49 a 0.91, refiriendo que los registros estimados por el satélite TRMM replican

eficientemente las precipitaciones registradas por las estaciones meteorológicas de la cuenca Ramis.

Se observa que la estación Buena Vista ubicada en la parte más baja de la cuenca (419 m.s.n.m.) registra una correlación baja con las precipitaciones medias de la cuenca generadas por el satélite TRMM-3B43, en este caso se observa que la precipitación es sobre estimada para todo el año, teniendo estimaciones muy por encima de la precipitación real registrada en la zona costera.

En el caso de la precipitación media mensual representativa de la cuenca Casma los resultados muestran un coeficiente de determinación de 0.66, el cual según la clasificación de (Andersen et al., 2001) es “satisfactorio”, una correlación de 0.82, el cual según la clasificación de (Barría, 2010) es “muy alto”, los valores simulados frente a los observados tienen una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.60 el cual según la clasificación de (Cabrera, 2009) es “muy bueno” y un sesgo porcentual de BIAS de 31.71%, lo cual nos indica una sobre estimación de la magnitud de las precipitaciones, esto sobre todo se aprecia en los meses de estiaje desde el mes de mayo hasta setiembre, donde en la serie histórica estimada por el satélite TRMM-3B43, presenta precipitaciones medias altas, lo cual difiere de los registros observados en las estaciones meteorológicas, similares resultados fueron obtenidos por (Coaquira, 2018) donde comparo las precipitaciones medias mensuales de la cuenca Huancané obteniendo un Nash de 0.61, un (R²) de 0.72, una correlación (r) de 0.85 y un (BIAS) de 21.61%, refiriendo que son resultados muy aceptables.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se realizó el análisis de consistencia y homogeneidad de datos históricos de precipitación de las 07 estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de la cuenca Casma, obteniéndose que las estaciones Yungay, Pariacoto y Cajamarquilla no eran homogéneas y tenían inconsistencias, mismas que se corrigieron mediante el método de curva doble masa.
- Se determinó la precipitación media mensualizada representativa de la cuenca Casma, para los meses desde enero 1998 hasta diciembre 2018, para lo cual se aplicó el método de interpolación IDW.
- Los resultados de la comparación de las series históricas de las estaciones meteorológicas y las estimadas por el satélite TRMM arrojan coeficientes de correlación “muy altos” para las estaciones de Pira, UNASAM y Yungay y “altos” para las estaciones de Pariacoto, Cajamarquilla y Chacchan, además de coeficientes de determinación que varían desde 0.37 a 0.68 siendo satisfactorias.
- La precipitación media mensual representativa de la cuenca Casma muestra un coeficiente de determinación de 0.66, una correlación de 0.82, una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.60 y un sesgo porcentual de BIAS de 31.71%, dichos resultados son muy satisfactorios y demuestran que los datos generados por el satélite TRMM en su algoritmo 3B43, son aceptables dado que sus datos tienen precisión a la hora de estimar los patrones de precipitación de la cuenca Casma, es así que estos datos pueden ser utilizados como datos complementarios de

entrada para la aplicación de modelos hidrológicos, generándose así una alternativa útil para las zonas donde no se cuente con información histórica de precipitación y brindando una alternativa más para los estudios de hidrología y la gestión de los recursos hídricos.

5.2. Recomendaciones

- Para la utilización de los datos de precipitación generados por el satélite TRMM 3B43, se recomienda realizar más investigaciones en cuencas con climas similares, con la finalidad de validar más los resultados expuestos en la presente investigación y poder utilizar dichos datos en zonas de climas similares.
- Se recomienda realizar investigaciones similares con otros productos del satélite TRMM como son la serie de datos diarios, además de agregar más estimaciones de otros satélites remotos que registren las precipitaciones ocurridas en la misma zona de estudio.
- Se recomienda realizar comparaciones de modelamientos hidrológicos utilizando datos de entrada generados por el satélite y precipitaciones registradas en la zona de estudio.
- Dado que actualmente en la mayoría del territorio del país no se cuentan con estaciones de medición climática, es necesario buscar herramientas que nos ayuden a llenar esos vacíos de información, por lo que es recomendable y es deber de todas las instituciones realizar investigaciones que ayuden a mejorar la gestión de cuencas, cuyos registros climáticos son nulos y no tienen una adecuada gestión.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andersen, J., Refsgaard, J. C., & Jensen, K. H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin — model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247(3–4), 200–214. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00384-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00384-5)
- Barría, P. (2010). *Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos baker y pascua*.
- Bateman, A. (2011). Hidrología básica y aplicada. *Brazilian Journal of Biology*, 71(1), 241–253. Retrieved from <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Brizuela, A., Nosetto, M., Aguirre, C., & Bressan, M. (2015). Comparación de datos de precipitación estimada por Trmm con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos , Argentina Comparison of Trmm Precipitation Data with Rain Gauge Data. *Revista Ud Y La Geomática*, (10), 18–26.
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, 1, 1–7. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Coaquira, Y. (2018). *Análisis Comparativo De Precipitaciones Medias Mensuales, Utilizando Datos De Satélite Trmm Y Estaciones Meteorológicas En La Cuenca Huancané*. Retrieved from http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2383/Oblitas_Huayllapuma_Elizabeth_Quinto_Apaza_Deyse.pdf?sequence=1
- Fernandes Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigacion* (6th ed.). Mexico: Mc Graw Hill Education.

- Hernández, R. (2014). Metodología de la Investigación. In *Mc Graw Hill* (6th ed., Vol. 7). Mexico.
- López, P., Seoane, R., Fornero, L. A., Rodríguez, J., & Nuñez, M. (2007). Análisis de tendencia en series autocorrelacionadas. *Instituto Nacional Del Agua*, (1), 8. Retrieved from <http://www.ina.gov.ar/pdf/CRA-HSup-J-Tendencia series aurocorrelacionadas.pdf>
- Lujano, E., Obando, F., Lujano, A., & Quispe, J. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 17(2), 221.
<https://doi.org/10.18271/ria.2015.116>
- Miranda, A. (2015). *Estimación De La Precipitación En La Cuenca Del Río Balsas Mediante El Uso De Satélites*.
- Moshinsky, R. M. (1995). Fundamentos de Radares Meteorológicos: Aspectos Clásicos. *ResearchGate*, 23(January 1995), 55–74.
- Ray K. Linsley, Max A. Kohler, J. L. H. P. (1977). Hidrología para ingenieros. *McGraw-Hill*, (2), 398.
- Rivas, J. (2014). *Análisis de la Correlación de Datos de Precipitación Entre el Satélite TRMM y las Estaciones Pluviométricas Ubicadas en la Cuenca del Río Bogotá*. UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
- Romero, E. L., Casimiro, W. L., Nacional, U., La, A., & Meteorología, S. N. De. (2015). *Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque , Perú hidrológicos . En los diferentes estudios de investigación , el punto de*

- espacial y temporal* (Tapiador et al ., 2003 ; 28(Noviembre), 42–52.
- Santos, D. (2017). Caracterizacion Hidrologica de la Region Madre de Dios. *SENAMHI*, 1–41. Retrieved from <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/110>
- Vargas, G. (2015). *Hidrología de Avenidas*. Lima: Universidad Continental.
- Villavicencio, E. (2019). Datos de precipitación y temperatura en zonas de escasa información de la región Ancash-período 2012-2017, 2019. *Ciencia e Investigación*, 1–138. Retrieved from http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4356/T003_45710128_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Villon Bejar, M. (2003). *Diseño de Estructuras Hidráulicas*. Cartago: MaxSoft.

VII. ANEXOS

Anexo 01: Mapa de ubicación de la cuenca Casma.

Anexo 02: Mapa de ubicación estaciones SENAMHI en la cuenca Casma.

Anexo 03: Mapa del área delimitada TRMM para la cuenca Casma.

Anexo 04: Mapa precipitación media areal de la cuenca Casma.

