

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA USANDO
IMÁGENES DIGITALES DEL SATÉLITE TRMM

PRESENTADO POR:
WALTER JOSE CACÑAHUARAY HUILLCAHUARI


ASESOR:
ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - 19 DE AGOSTO DE 2015

“ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA USANDO
IMÁGENES DIGITALES DEL SATÉLITE TRMM”.

RECOMENDADO : 28 DE JUNIO DEL 2015

APROBADO : 05 DE AGOSTO DEL 2015




MSc. Ing. Carlos A. PRADO PRADO
(PRESIDENTE)



Ing. Jaime L. BENDEZÚ PRADO
(MIEMBRO)



Ing. Cristian CASTRO PÉREZ
(MIEMBRO)



Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
(MIEMBRO)



Ing. Floro N. YANGALI GUERRA
(SECRETARIO DOCENTE)

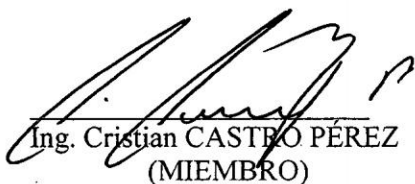
Según el acuerdo constatado en el Acta, levantado el 05 de agosto del 2015, en la Sustentación de Tesis presentado por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil Sr. **Walter José CACÑAHUARAY HUILLCAHUARI**, con la Tesis Titulado “**ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA USANDO IMÁGENES DIGITALES DEL SATÉLITE TRMM**”, fue calificada con la nota de QUINCE (15) por lo que se da la respectiva APROBACIÓN.



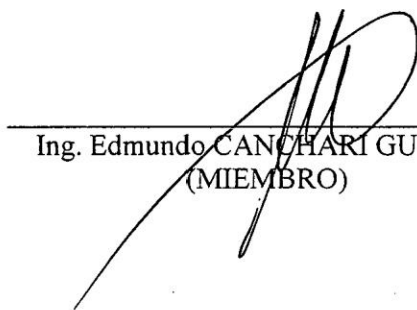
MSc. Ing. Carlos A. PRADO PRADO
(PRESIDENTE)



Ing. Jaime L. BENDEZU PRADO
(MIEMBRO)



Ing. Cristian CASTRO PÉREZ
(MIEMBRO)



Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
(MIEMBRO)



Ing. Floro N. XANGALI GUERRA
(SECRETARIO DOCENTE)

ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA USANDO IMÁGENES
DIGITALES DEL SATÉLITE TRMM

WALTER JOSE CACÑAHUARAY HUILLCAHUARI

Presentado a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil en cumplimiento
parcial de los requerimientos para obtener el Título de:

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

2015

Autor : Walter Jose Cacñahuaray Huillcahuari
Recomendado por : Ing. Edmundo Canchari Gutiérrez
Asesor de Tesis
Aceptado por : Ing. Carlos Prado Prado
Decano de la FIMGC

©2015; Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga(UNSCH), todos los derechos reservados o el autor autoriza a la UNSCH - Escuela Profesional de Ingeniería Civil (EPIC) a reproducir la tesis en su totalidad o en partes.

Dedicatoria

*Para mis padres y mis hermanos, a mi esposa y
mis hijos.*

Agradecimientos

Mi sincero reconocimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por su acertada guía en la formación del Ingeniero Civil, de igual manera a los revisores de la presente Tesis.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Ayacucho, Octubre de 2014

Walter Jose Cacñahuaray Huillcahuari

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Índice general	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
Resumen	X
Introducción	1
1. Generalidades	3
1.1. Antecedentes bibliográficos	3
1.1.1. Antecedentes a nivel nacional	3
1.1.2. Estudios realizados a nivel internacional	4
1.1.3. Instituciones nacionales	4
1.2. Descripción de la realidad problemática	5
1.3. Formulación del problema	6
1.3.1. Problema principal	6
1.3.2. Problemas secundarios	6
1.4. Justificación e importancia de la investigación	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivos Generales	7
1.5.2. Objetivos Específicos	7
1.6. Hipótesis	7
1.6.1. Hipótesis principal	7
1.6.2. Hipótesis secundarios	7
1.7. Variables e indicadores	8
1.7.1. Variables	8

1.7.2. Indicadores	9
1.8. Unidad de análisis	9
1.9. Tipo y nivel de investigación	9
1.10. Periodo de análisis	9
1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados	10
1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos	10
1.12.1. Recolección de datos	10
1.12.2. Procesamiento de datos	10
2. Marco teórico y marco conceptual	11
2.1. Satélite TRMM	11
2.1.1. Importancia del satélite TRMM	12
2.1.2. Instrumentos del satélite TRMM	12
2.1.3. Productos del TRMM	14
2.1.3.1. Datos primarios	14
2.1.3.2. Productos orbitales (orbital products)	15
2.1.3.3. Productos grid (gridded products)	15
2.1.4. Producto 3B42 del satélite TRMM	15
2.2. Análisis de registros anuales	16
2.2.1. Análisis de homogeneidad o consistencia	16
2.2.2. Análisis de promedios móviles	17
3. Materiales y métodos	18
3.1. Zona de estudio	18
3.2. Información Básica	19
3.2.1. Cartográfica	19
3.2.2. Imágenes satelitales	19
3.3. Propiedades requeridas de la cuenca	20
3.3.1. Sub cuencas	20
3.3.2. Características morfométricas	22
3.3.3. Características fisiográficas	22
3.3.4. Características hidrográficas	22
3.4. Registro de precipitaciones	22
3.4.1. Estaciones con registros en el sitio	24
3.4.2. Registro de precipitaciones en estaciones sintéticas	24
3.5. Análisis de homogeneidad y consistencia	26
3.5.1. Estación Putacca	26
3.5.2. Estación Cuchoquesera	28
3.5.3. Estación Allpachaca	29
3.5.4. Estaciones sintéticas TRMM	31

3.6. Precipitaciones registradas en el sitio y TRMM	34
3.7. Caudales de máxima avenida	35
3.7.1. Análisis estadístico de la precipitación	37
3.7.2. Número de curva	37
3.7.3. Precipitación efectiva	39
3.7.4. Caudal máximo de las subcuencas	39
3.7.5. Caudal máximo de la cuenca del Río Cachi	39
4. Análisis y discusión de los resultado de la tesis	40
4.1. Estructuras de captación seleccionadas	40
4.1.1. Bocatoma Churiacc	40
4.1.2. Bocatoma Apacheta	41
4.1.3. Bocatoma Choccoro	42
4.1.4. Bocatoma Chicllarazo	42
4.2. Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica y la red hídrica .	43
4.3. Precipitación de diseño	44
4.4. Caudal máximo	45
5. Conclusiones y recomendaciones	46
5.1. Conclusiones	46
5.2. Recomendaciones	47
Acrónimos	48
Referencias bibliográficas	49
Anexo A. Regresión lineal múltiple	54
A.1. Conceptos básicos	54
A.2. Obtención del modelo general	54
A.2.1. Función de regresión muestral	56
A.2.2. Coeficiente de determinación	57
Anexo B. Registros 3B42 daily TRMM	59
Anexo C. Registro de precipitaciones	62
Anexo D. Obtención de caudales	64
Anexos	54
Anexo E. Planos	85

Índice de tablas

2.1. Definición por nivel de los productos TRMM	14
2.2. Productos disponibles del satélite TRMM (Orbital Products)	15
2.3. Productos disponibles del satélite TRMM (Gridded Products)	16
3.1. Cuadrantes contenidos por la cuenca del Río Cachi	19
3.2. Propiedades morfométricas sub cuencas del Río Cachi	22
3.3. Propiedades fisiográficas e hidrográficas de la cuenca del río Cachi	23
3.4. Estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Cachi	24
3.5. Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Putacca	27
3.6. Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Cuchoquesera	29
3.7. Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Allpachaca	30
3.8. Test de Helmart para el registro de la precipitación anual en la estación sintética TRMM Putacca	31
3.9. Precipitaciones para 100 años de tiempo de retorno	37
3.10. Número de curva determinadas para las subcuencas	38
3.11. Precipitación efectiva	38
3.12. Caudal de máxima avenida de las subcuencas	39
4.1. Ubicación de las captaciones(sistema de ubicación UTM, DATUM: WGS 1984, Huso: 18, Zona: L)	41
4.2. Propiedades morfométricas de las sub cuencas y la red hídrica	44
4.3. Precipitación de diseño	44
4.4. Precipitación de diseño obtenido	45
4.5. Caudales máximos obtenidos para las cuencas seleccionadas	45

Índice de figuras

2.1. Satélite TRMM e instrumentación	13
3.1. Cuadrantes de acuerdo al cuadro de empalmes de la carta nacional . . .	20
3.2. Cuenca del Río Cachi	21
3.3. Sub cuencas del Río Cachi	23
3.4. Estaciones meteorológicas ubicadas en la Cuenca del Río Cachi	25
3.5. Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Putacca . .	27
3.6. Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Cuchoquesera	28
3.7. Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Allpachaca	30
3.8. Precipitación promedio anual y precipitación anual estación sintética TRMM Putacca	32
3.9. P24h estación estación sintética Cuchoquesera - TRMM	33
3.10. Variación de la precipitación TRMM - Estación Cuchoquesera	33
3.11. Estaciones sintética TRMM y Cuchoquesera	34
3.12. Ubicación de las estaciones en una celda del TRMM	35
3.13. Relación de las precipitaciones	36
3.14. Archivo TRMM, cuenca del río Cachi y estaciones meteorológicas . . .	36
4.1. Esquema de la ubicación de las estructuras de captación (figura adaptada desde Google Earth)	41
4.2. Obras hidráulicas seleccionadas (Adaptado desde ArcGIS)	42
4.3. Sub cuencas delimitadas para cada obra de captación considerada (Adaptado desde ArcGIS)	43
A.1. Expresión individual para cada muestra	55
A.2. Identificación matricial de variables conocidas y desconocidas	55
A.3. Modelo de regresión múltiple expresado en forma matricial	55
A.4. Estimación de la FRP	56
A.5. Residuo	56
A.6. identificación de vectores	57
B.1. Página principal PMM(Precipitation Measurement Mission)	59

B.2. Página principal TRMM	60
B.3. Descargar datos desde TRMM	61
B.4. Producto 3B42	61

Resumen

En la presente investigación se aprovecha los datos meteorológicos obtenidos mediante el satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission - Misión de Medición de Lluvias tropicales); el satélite TRMM fue puesto en órbita alrededor de la tierra el 27 de noviembre de 1997 entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration - Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) de los Estados Unidos de América y la Agencia JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency - Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa) con la finalidad de monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales, entre las latitudes 35° Norte y latitud 35° Sur. El trabajo inicia con la delimitación de la Cuenca en estudio - cuenca del Río Cachi - mediante herramientas de Sistemas Información Geográfica aplicado mediante Software libre, las temáticas necesarias (lagos, red hídrica, topografía, ciudades, caminos, áreas protegidas, etc) en formato vectorial se obtienen desde el Instituto Geográfico Nacional (IGN), siguiendo con la caracterización morfo-métrica de la cuenca y el registro de las estaciones Hidro-Meteorológicas establecidas en la cuenca de estudio y cuencas vecinas. Para el registro de las estaciones hidro-meteorológicas se tiene en cuenta el *“Mapa de Ubicación de las Estaciones Climatológicas”* y el *“Mapa de Ubicación de las Estaciones Hidrométricas”* obtenidas desde la ANA (Autoridad Nacional del Agua) y SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), identificado el registro histórico de datos de precipitación, se realiza la comprobación de la consistencia y homogeneidad para luego extender a un mismo periodo de registro, seguidamente se obtiene la precipitación promedio en la zona de interés. Por otra parte, se obtiene las precipitaciones a partir del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) para la zona de interés, las mismas que serán sometidas a un análisis respecto a las precipitaciones obtenidas por medidas directas obtenidas desde SENAMHI; ya que la finalidad es validar los datos obtenidos desde TRMM, sus registros serán calibrados para ser utilizados en la cuenca de interés.

Palabras clave: TRMM, GPM, precipitación, Disponibilidad Hídrica, Caudal, Transformación lluvia esorrentía

Introducción

Disponer la información sobre la disponibilidad hídrica cuando se proyectan trabajos sobre el aprovechamiento del agua es fundamental; en el Perú existen pocos registros que miden directamente el nivel del agua y en consecuencia siempre es necesario el uso de los modelos matemáticos de transformación de la precipitación en escorrentía. El registro de las precipitaciones necesarias se obtienen desde el proyecto TRMM (parte del proyecto Global Precipitation Measurement (GPM)), dado que estas precipitaciones no pueden ser utilizados directamente, son validados previamente mediante las precipitaciones medidas en las áreas de influencia de la cuenca en estudio, registros obtenidos desde Autoridad Nacional de Agua (ANA) y Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), con la precipitación TRMM validada, se obtienen los registros de precipitación necesarios en los puntos de interés en correspondencia a la cuenca analizada, desde las precipitaciones así obtenidas se procede a obtener el caudal de máximas avenidas asociada a la precipitación de diseño.

Seguidamente se presenta una breve presentación, el contenido desarrollado en la tesis:

- *Capítulo uno:* las generalidades, se presenta las generalidades de la tesis: antecedentes bibliográficos, descripción de la realidad problemática, formulación del problema, justificación e importancia de la investigación, objetivos, hipótesis, variables e indicadores, unidad de análisis, tipo y nivel de investigación, periodo de análisis, fuentes de información e instrumentos utilizados, técnicas de recolección y procesamiento de datos.
- *Capítulo dos:* correspondiente al marco teórico y marco conceptual, se desarrolla la fundamentación teórica concerniente a la tesis; inicia con los métodos disponibles para el registro de las precipitaciones, centrándose específicamente en los métodos por percepción remota, trata sobre los modelos necesarios para la determinación de la precipitación total para un tiempo de retorno designado, este último asociado a la importancia del proyecto hidráulico; seguidamente se describen los métodos para la obtención de la precipitación de diseño, obtención de las abstracciones en la cuenca de interés, modelos para la precipitación efectiva y la

documentación sobre los hidrogramas unitarios sintéticos y el tránsito hidrológico de hidrograms.

- *Capítulo tres:* desarrolla del trabajo de tesis, los materiales y métodos para la obtención de la disponibilidad hídrica asociada a la precipitación de diseño - hidrograma de máximas avenidas. A nivel de los datos se comprueba la consistencia y homogeneidad de los mismos, la validación de las precipitaciones TRMM a base de los registros obtenidos desde ANA(Autoridad Nacional del Agua) y SENAMHI(Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), con los datos definidos y basado en la fundamentación teórica se procede a obtener los caudales de máxima avenida para la cuenca de aplicación.
- *Capítulo cuatro:* análisis - resultado de la investigación, en el presente capítulo se contrasta los resultados obtenidos con la información técnica del proyecto de aplicación de la tesis, es fundamental aclarar que la documentación técnica existente basa sus cálculos en base a formulaciones y modelos determinísticos al igual que la presente tesis, la diferencia radica en la obtención de los registros de las precipitaciones, donde la información disponible se basa en los registros disponibles desde ANA y SENAMHI, mientras en el desarrollo del presente trabajo se valida las precipitaciones obtenidas mediante el proyecto TRMM, basado en la percepción remota.
- *Capítulo cinco:* conclusiones y recomendaciones, incluye las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para el uso de los registros TRMM en proyectos de aprovechamiento hídrico.
- *Anexos:* contiene la base de datos requerido para la obtención de los hidrogramas de máxima avenida concernientes al trabajo realizado, registro de las precipitaciones, mapas de la cuenca analizada y sus propiedades morfométricas requeridas para el desarrollo de la tesis.

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Antecedentes bibliográficos

El uso del registro de la precipitación TRMM fue ampliamente estudiado en todos los países, se consideran (el proyecto TRMM, es el resultado de un esfuerzo conjunto entre National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)):

1.1.1. Antecedentes a nivel nacional

En el Perú existen investigaciones realizadas para el aprovechamiento del registro histórico de las precipitaciones del conjunto de los satélites del proyecto TRMM, en la Investigación “Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007)” publicado en la “Revista Peruana Geo-Atmosférica” en el año 2010, el estudio [18] fue con el objetivo de estimar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación sobre las zonas de montaña de los andes peruanos, se analizaron los registros mensuales de precipitación in situ (medidas en estaciones meteorológicas) y del satélite TRMM, específicamente el producto 3B42 extendido (precipitación diaria).

Otra investigación realizada “Validation of rainfall using the TRMM for two Peruvian Amazon basins and its inclusion in monthly water balance models” publicada por la “Revista Peruana Geo-Atmosférica” en el año 2009, dicha investigación [17] concluye que los datos del TRMM y su mejoramiento se comportan como los mejores para describir los regímenes hidrológicos sobre regiones con pobre distribución de estaciones pluviométricas en la cuenca amazónica peruana, pero los registros en estaciones meteorológicas, los registros de lluvia son indispensables para validar y mejorar los datos de

lluvia. Futuros trabajos en esta región se centraran en mejorar los datos TRMM a nivel diario (producto 3B42) usando información observada así como modelos hidrológicos a pasa de tiempo diario.

El artículo “Estimación de la tasa de lluvia sobre Perú durante el verano del 2002 usando imágenes de los satélites GOES-8 y TRMM” presentado en el “Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Brasil” - la investigación [28] muestra la tasa de lluvia mensual estimada a partir las imágenes infrarrojas (IR) térmicas del satélite GOES-8 sobre Perú durante el verano (Enero-Febrero-Marzo) de 2002 y se compara con las estimadas por el satélite TRMM.

1.1.2. Estudios realizados a nivel internacional

A nivel de América del sur, el artículo titulado “Es el radar TRMM(NASA, JAXA) un buen estimador de las precipitaciones de la región central Argentina” - Publicado por la Universidad Nacional de San Luis - Argentina [23], el objetivo de este trabajo fue comparar los datos estimados por TRMM con los datos de campo registrados por pluviómetros del Servicio Meteorológico Nacional (Argentina), a lo largo de un gradiente de precipitaciones y a distintas escalas temporales; los resultados obtenidos fueron buenos en estimar tendencias globales y patrones regionales de distribución espacial, pero no con suficiente resolución a escalas de más detalle.

En Europa, la Tesis Doctoral “Estudio de la Utilidad de la Lluvia Estimada de Satélite en la Modelación Hidrológica Distribuida” - Valencia, enero 2013, el objetivo de la tesis [31] es evaluar la utilidad de dos productos de lluvia estimada de satélite, a través de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca mediterránea extratropical, como una alternativa de estimación de la precipitación en aquellas regiones donde los pluviómetros convencionales son escasos o inexistentes.

A nivel de América del Norte y Europa existe muchos estudios con la misma finalidad que los estudios locales - que es validar las precipitaciones registradas por TRMM para aprovecharlo en estudios de la estimación del potencial hídrico de una determinada cuenca.

1.1.3. Instituciones nacionales

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, así también, un organismo especializado adscrito al Ministerio de Agricultura. La Autoridad

Nacional del Agua es el organismo encargado de realizar las acciones necesarias para el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas, en el marco de la gestión integrada de los recursos naturales y de la gestión de la calidad ambiental nacional estableciendo alianzas estratégicas con los gobiernos regionales.

El Servicio nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) una Institución que desde 1969 brinda servicios públicos, asesoría, estudios e investigaciones científicas en las áreas de Meteorología, Hidrología, Agrometeorología y Asuntos Ambientales en beneficio del país. Actualmente SENAMHI, es un organismo público ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente. El SENAMHI tiene las siguientes funciones: Organizar, operar, controlar y mantener la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas, Hidrológicas y Agrometeorológicas, de conformidad con las normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y las necesidades de desarrollo nacional, a excepción de las redes de estaciones establecidas con fines específicos. Realizar y formular los estudios e investigaciones que satisfagan las necesidades de desarrollo y defensa nacional, en lo concerniente a su aplicación en las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras conexas. Asesorar y brindar apoyo técnico que requieran las entidades públicas y privadas para el desarrollo de actividades en las que sea necesario el empleo de información y técnicas relacionadas con las funciones del SENAMHI.

1.2. Descripción de la realidad problemática

En todo proyecto cuya finalidad es el Aprovechamiento de Recursos Hídricos de una determinada zona (una determinada cuenca hidrográfica) es necesario contar con el registro de variables hidrológicas y climatológicas; la información de la variable hidrológica se requiere en el punto de interés donde se fundará una estructura ya sea para el aprovechamiento del recurso hídrico o en protección contra éste, por otra parte, los registros climatológicos (temperatura, humedad, precipitación, etc.) generalmente son registrados en el área de influencia al punto de aprovechamiento del recurso hídrico (cuenca hidrográfica). En nuestro país las instituciones encargadas del registro y el mantenimiento de las estaciones hidro-meteorológicas son la *Autoridad Nacional del Agua* y el *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología* las mismas que se encuentran en proceso de desarrollo llevando proyectos de establecimiento de estaciones climáticas e hidrológicas en todo el Perú; pero las estaciones existentes actualmente son escasas, con muy poco registro histórico de información y una gran parte de las existentes no se encuentra en funcionamiento adecuado.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema principal

¿Es posible el uso de los registros de precipitación del proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission - Misión de Medición de Lluvias tropicales) para estimar el hidrograma de máxima avenida en la Cuenca del Río Cachi?

1.3.2. Problemas secundarios

- Carencia de registro histórico de precipitaciones para realizar estudios en el planeamiento de proyectos que atañen el aprovechamiento de recursos hídricos.
- ¿Son las precipitaciones obtenidas mediante el proyecto TRMM equivalente a las obtenidas mediante registros directos en las estaciones meteorológicas en la cuenca del Río cachi?
- ¿Es necesario el registro de las precipitaciones en estaciones meteorológicas en la Cuenca del Río Cachi para validar los registros del proyecto TRMM?.
- Insuficiencia de estaciones meteorológicas en la Cuenca del Río Cachi.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

El Gobierno del Perú en los últimos años se encuentra impulsando el desarrollo en todas las áreas, entre ellos el aprovechamiento adecuado y sostenible de los recursos hídricos, con proyectos de diversa naturaleza: centrales hidroeléctricas, irrigaciones, dotación de agua para consumo humano, etc.; es en esta punto el interés de disponer del registro histórico de los datos hidrometeorológicos con la finalidad de estimar el recurso hídrico, dado la escasa información disponible por las instituciones encargadas (ANA, SENAMHI), no es posible el estudio adecuado del potencial hídrico en la zona de interés; es donde interviene el uso de los datos medidos con el satélite TRMM, que se encuentra como información libre con registros desde el año 1997.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales

Obtener el hidrograma de máximas avenidas para la cuenca del Río Cachi en base a los registros de precipitación validados del proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission - Misión de Medición de Lluvias tropicales).

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar que los registros de precipitación obtenidos mediante el proyecto TRMM son adecuados para el planeamiento de proyectos de aprovechamientos hídricos.
- Evaluar el análisis comparativo de las precipitaciones obtenidas mediante el satélite TRMM y las obtenidas mediante mediciones directas por las estaciones meteorológicas en la cuenca del Río cachi.
- Validar (verificar, contrastar la calidad de los registros, si resultan inadecuados se deberá corregir) los registros del proyecto TRMM en la cuenca del Río Cachi tomando como referencia los registros de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas.
- Crear estaciones sintéticas(registro de precipitaciones) en base al proyecto TRMM.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis principal

El registro de las precipitaciones obtenidas mediante el proyecto TRMM, previa validación, permite obtener el hidrograma de máximas avenidas para la cuenca del Río Cachi.

1.6.2. Hipótesis secundarios

- Los registros de precipitación obtenidos mediante el proyecto TRMM son adecuados para el planeamiento de proyectos de aprovechamientos hídricos.

- Las precipitaciones obtenidas mediante el satélite TRMM son equivalentes a las obtenidas mediante mediciones directas por las estaciones meteorológicas en la cuenca del Río cachi.
- La validación de los registros de precipitación diaria del proyecto TRMM se efectúa en base a los registros en las estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Cachi.
- El registro de las precipitaciones en las estaciones sintéticas basada en el proyecto TRMM, son equivalentes a los registros de precipitación obtenido en las estaciones meteorológicas, previa validación.

1.7. Variables e indicadores

1.7.1. Variables

Una variable [12] es un factor, evento, situación o fenómeno que representa cierto interés dentro de la investigación y del cual se precisa conocer su intensidad o categoría. Se conoce como variable porque el factor estudiado “puede” obtener distintos valores, es decir, varía entre una observación y otra. Existen básicamente tres variables que participan de todo proceso de investigación: Independientes, dependientes e intervinientes.

- Variables directas. Aquellas que se consideran las causas. Se identifica [26] siempre una variable cuya magnitud o característica se relaciona con otra a la cual afecta. La variable directa objeto de estudio en la tesis es la cuenca hidrográfica asociada al proyecto de aplicación.
- Variables indirectas. Son aquellas que dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. La variable indirecta son las características climáticas de la cuenca y solamente se tomará la precipitación.
- Variables intervinientes. Definido como aquellas variables que no son causas ni consecuencias pero tienen importancia en el estudio ya que podrían servir de explicación parcial a determinadas características consecuentes o porque son moderadoras del efecto de la variable independiente. Entre estas variables identificadas para la presente investigación se tienen: las características topográficas del cauce principal de la cuenca, condiciones de cobertura, tipos de suelo, usos de suelo.

1.7.2. Indicadores

Al referirnos a los conceptos indicamos que estos no son observables directamente. Por lo tanto, se deben buscar procedimientos que permitan la medición indirecta mediante manifestaciones externas, empíricas y observables. Tales manifestaciones o expresiones reciben el nombre de indicadores.

- Indicador asociada a la variables directas. Ubicación y las características morfo-métricas de la cuenca de interés.
- Indicador asociada a la variable indirectas. El registro de las precipitaciones y la precipitación diaria máxima anual.

1.8. Unidad de análisis

La unidad de análisis es la cuenca del Río Cachi, sobre el cual se analizará la variación de las precipitaciones registrados tanto desde TRMM y las directamente registradas mediante las estaciones monitoreadas por ANA y SENAMHI.

1.9. Tipo y nivel de investigación

El trabajo de tesis se basa en un enfoque de investigación cuantitativa y el alcance (o nivel) está definido como correlacional.

1.10. Periodo de análisis

La disponibilidad de los datos, en este caso, define el periodo de análisis, desde enero 1998 hasta diciembre de 2014 son disponibles los registros del TRMM, sin embargo, los registros disponibles y de dominio público por ANA y SENAMHI son los que determinarán finalmente el periodo de la disponibilidad de los datos.

1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados

Para las precipitación se utiliza los registros diarias del proyecto TRMM, específicamente el producto 3B42 v7 y las disponibles en la cuenca de interés obtenidos desde ANA y SENAMHI. En la delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca se utiliza sistemas de información geográfica.

1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Teniendo en cuenta los métodos de muestreo, se clasifica [27] en dos grandes grupos: muestreo probabilístico y muestro no probabilístico.

1.12.1. Recolección de datos

En la investigación desarrollada no se emplea un mecanismo aleatorio, sino se realiza con base a criterios de conveniencia. Se utiliza un muestreo no probabilístico, muestreo de juicio o de selección intencional. Las ubicación de las estaciones climatológicas a nivel del suelo determinan y condicionan la obtención del registro de las precipitaciones desde TRMM para el cuadrante asociado.

1.12.2. Procesamiento de datos

En este caso, investigar a toda la población de datos existente es costoso, por esta razón los estudios se realizan sobre una *muestra representativa de la población*, que contenga teóricamente las mismas características de una población que se desean estudiar. Los datos recogidos son evaluados estadísticamente con la finalidad de demostrar que la muestra obtenida dispone de las propiedades de la población de datos, luego de superar esta etapa, se continua con la validación del registro de las precipitaciones y la obtención del hidrograma de máxima avenida..

Capítulo 2

Marco teórico y marco conceptual

El presente capítulo contiene la fundamentación teórica sobre el cual se sustenta el trabajo efectuado, se tratará de manera detallada los modelos determinísticos de transformación de la lluvia en escorrentía (delimitación de la cuenca de interés, identificación de las estaciones con registro de precipitaciones diarias, obtención de las precipitaciones diarias desde TRMM producto 3b42, validación de la precipitación TRMM, obtención de la precipitación en las zonas de interés, obtención de la precipitación total para el tiempo de retorno determinado, precipitación de diseño, obtención de las abstracciones en la cuenca hidrográfica y la precipitación efectiva, hidrograma para cada sub cuenca determinada y finalmente la respuesta total mediante el tránsito hidrológico de los hidrogramas obtenidos) y los registros realizados basado en percepción remota por el proyecto TRMM y el uso del producto 3B42, correspondiente a la precipitación diaria.

2.1. Satélite TRMM

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) es un conjunto de satélites, proyecto en un esfuerzo conjunto entre de la NASA y JAXA que registra la precipitación y dispone la información para poner a prueba y mejorar los modelos climatológicos actuales. El satélite TRMM está especialmente dedicado a la determinación de las precipitaciones en las zonas tropicales y subtropicales de la Tierra, éstas regiones representan alrededor de dos tercios de la precipitación total en la tierra y son responsables de dirigir nuestro tiempo y el sistema climático.

2.1.1. Importancia del satélite TRMM

La medición precisa de la variación espacial y temporal de las precipitaciones tropicales de todo el mundo sigue siendo uno de los problemas fundamentales no resueltos de la meteorología. El TRMM [10] registra las precipitaciones entre las latitudes 35° Norte y 35° Sur, proporcionado por primera vez una base de datos completa y detallada sobre la distribución de la precipitación en cuatro dimensiones (espacial y temporal) a nivel de los continentes y los océanos correspondientes con los trópicos. La TRMM, "Misión de Medición de Lluvias tropicales" (Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM) es un esfuerzo de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales, entre las latitudes 35° Norte y 35° Sur. El término encierra toda la misión espacial del satélite y la investigación de los datos obtenidos.

Mediante el uso de mediciones del TRMM, Figura 2.1, los se espera entender mejor el sistema climático actual y crear modelos matemáticos capaces de predecir los cambios climáticos en el futuro próximo.

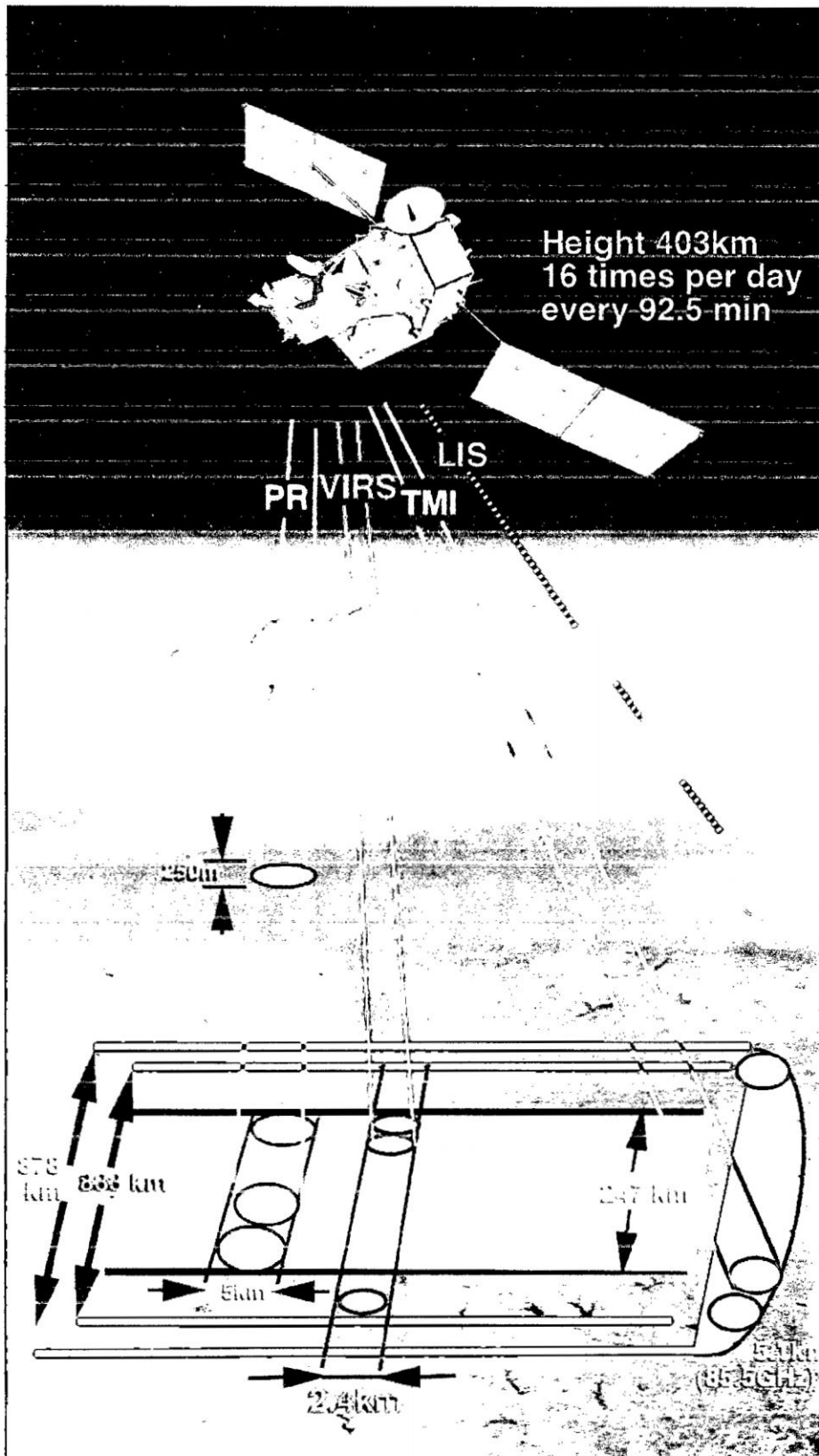
2.1.2. Instrumentos del satélite TRMM

Los instrumentos¹ bordo del satélite TRMM se describen brevemente:

- Radar meteorológico de lluvia (PR): proporcionar mapas tridimensionales de la estructura de una tormenta.
- Imágenes por microondas del TRMM (TMI): es un sensor de microondas pasivo diseñado para proporcionar información cuantitativa sobre las precipitaciones de una amplia franja bajo el satélite TRMM.
- Escáner del Visible y del Infrarrojo (VIRS): mide la radiación que viene desde la Tierra en regiones espectrales.
- Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes (CERES): mide la energía al tope de la atmósfera, así como estima los niveles de energía dentro de la atmósfera y de la superficie terrestre.
- Sensor de Imágenes de Relámpagos (LIS): es un instrumento pequeño y altamente sofisticado que detecta y localiza las descargas eléctricas sobre toda la región tropical de la tierra.

¹Para un información detallada consultar la siguiente dirección http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/instrumentfacts.html

Figura 2.1: Satélite TRMM e instrumentación



Fuente: Tomado desde <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

Tabla 2.1: Definición por nivel de los productos TRMM

Identificación	Descripción
Level 0	Raw instrument data
Level 1A	Reconstructed, unprocessed instrument data at full resolution, time referenced, and annotated with ancillary information, including radiometric and geometric calibration coefficients and georeferencing parameters (i.e., platform ephemeris), computed and appended, but not applied, to Level 0 data.
Level 1B	Radiometrically corrected and geolocated Level 1A data that have been processed to sensor units.
Level 2	Derived geophysical parameters at the same resolution and location as those of the Level 1 data.
Level 3	Geophysical parameters that have been spatially and/or temporally resampled from Level 1 or Level 2 data.
Level 4	Outputs or results from models using lower level data as inputs and, thus, not directly derived from the instruments

Fuente: Adaptado desde <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

2.1.3. Productos del TRMM

El conjunto de datos de precipitación, conocidos como “productos”, están disponibles en una variedad de niveles [10, página 262] que denotan la cantidad de procesamiento de datos que ha pasado. Estos van desde los datos primarios o directamente medidas a resultados obtenidos al aplicar los modelos matemáticos, teniendo como entrada los datos primarios. A continuación se presentan las definiciones de cada nivel.

2.1.3.1. Datos primarios

La Tabla 2.1 contiene el nivel de los datos y la descripción de cada uno de ellos directamente obtenidos mediante el satélite TRMM. En la actualidad, TRMM tiene cada uno de estos productos de datos disponibles para su descarga pública, a excepción de los productos del nivel 4.

2.1.3.2. Productos orbitales (orbital products)

Se enumera seguidamente los productos disponibles en la actualidad del satélite TRMM. Para una información detalla se recomienda consultar en la página web del TRMM, la Tabla 2.2 muestra la descripción del producto y su identificación.

Tabla 2.2: Productos disponibles del satélite TRMM (Orbital Products)

Identificación	Nombre del Producto
1B01	Visible and Infrared Radiance
1B11	Microwave Brightness Temperature (TMI)
1B21	Precipitaion Radar (PR) Power
1C21	Precipitation Radar (PR) Reflectivity
2A12	TMI Hydrometeor Profile
2A21	Precipitation Radar (PR) Surface Cross-Section
2A23	Precipitation Radar (PR) Rain Characteristics
2A25	Precipitation Radar (PR) Rainfall Rate and Profile
2B31	Combined Rainfall Profile (PR, TMI)

Fuente: Adaptado desde <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

2.1.3.3. Productos grid (gridded products)

La Tabla 2.3 muestra la identificación y la descripción de los productos en *formato .grid* disponibles actualmente del satélite TRMM, estos datos se encuentran creados para la manipulación de la información mediante sistemas de información geográfica.

2.1.4. Producto 3B42 del satélite TRMM

El producto 3B42 provee datos diarios mediante tasas de precipitación en mm/h, con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (latitud x longitud). El Producto 3B42 usa una combinación de estimaciones de precipitación del TRMM y otros satélites para ajustar las estimaciones basadas en mediciones de radiación infrarroja de los satélites geoestacionarios. Los datos se encuentran organizados en función del tiempo para su descarga directa en formato DDF (Hierarchical Data Format), cuyo nombre de los archivos está en correspondencia a la fecha elegida, el nombre general es de la forma: 3B42.YYMMDD.H.7.HDF. Donde²:

²Para la manipulación de los datos desde Matlab, usar en entorno hdftool

Tabla 2.3: Productos disponibles del satélite TRMM (Gridded Products)

Identificación	Nombre de Producto
3A11	Monthly 5° x 5° Oceanic Rainfall
3A12	Monthly 0.5° x 0.5° mean 2A12, profile, and surface rainfall
3A25	Monthly 5° x 5° and .5° x .5° Spaceborne Radar Rainfall
3A26	Monthly 5° x 5° Surface Rain Total
3B31	Monthly 5° x 5° Combined Rainfall
3A46	Monthly 1° x 1° SSM/I Rain
3B42	3-hour 0.25° x 0.25° TRMM and Other-GPI Calibration Rainfall
3B43	Monthly 0.25° x 0.25° TRMM and Other Sources Rainfall
CSH	Monthly 0.5° x 0.5° Convective & Stratiform Heating

Fuente: Adaptado desde <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

- **3B42:** indica el código del producto del satélite TRMM, en este caso la medición de las precipitaciones.
- **YY:** indica el año
- **MM:** indica el mes
- **DD:** indica el día
- **7:** corresponde con la versión del algoritmo utilizado
- **HDF:** extensión del archivo

2.2. Análisis de registros anuales

2.2.1. Análisis de homogeneidad o consistencia

Una serie de datos es llamada homogénea [2, página 4-19] si es una muestra de una única población, si los datos evaluados son no homogéneos se deben realizar correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean válidas estimaciones de los parámetros poblacionales.

En los análisis climatológicos [5] se utiliza el término de homogeneidad de la serie y en

los análisis hidrológicos se emplea el término de consistencia de la serie, ambos términos son sinónimos pues indican un cambio en la cantidad de lluvia medida por una estación. La homogeneidad se analiza comúnmente a través de técnicas estadísticas, y en cambio, la consistencia por lo general se detecta con la técnica de la curva masa doble.

Entre los tipos de pruebas estadísticas de homogeneidad se tiene:

- Prueba estadística de Helmert
- Prueba estadística de las secuencias
- Prueba estadística de la t de student
- Prueba estadística de Cramer
- Prueba estadística de Wald - Wolfowitz
- Técnicas de la curva masa doble

2.2.2. Análisis de promedios móviles

Luego de analizar la inconsistencia de las lluvias anuales, es necesario estudiar tal registro como una serie cronológica o series de tiempo; mediante esta técnica [34] se detecta los *años secos y años húmedos*, así como la *tendencia y estacionalidad* de la serie, si ésta existe.

Una serie cronológica o serie de tiempo es toda secuencia de observaciones tomados en tiempos específicos y generalmente igualmente espaciados. una serie cronológica dispone de cuatro componentes característicos :

- Tendencia: indica hacia donde “tiende” la serie cronológica.
- Componente estacional: indica las variaciones periódicas que ocurren a largo plazo - en periodos mayores a un año.
- Componente irregular: indica las variaciones de los componentes que ocurren al azar (aleatoriedad).

Capítulo 3

Materiales y métodos

Disponiendo de la fundamentación teórica, el presente capítulo es con fines del desarrollo de la aplicación práctica de la tesis, la disponibilidad hídrica será obtenido para la cuenca del Río Cachi y para este fin se utilizará los registros en las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la superficie de interés y áreas contiguas, generando las precipitaciones desde el proyecto TRMM para las superficies requeridas, las precipitaciones así obtenidas serán previamente validadas con fines de la obtención del hidrograma. El procedimiento a seguir será: delimitación de la cuenca de interés, caracterización morfométrica, identificación de las estaciones con registro de precipitaciones diarias, obtención de las precipitaciones diarias desde TRMM producto 3b42, validación de la precipitación TRMM, obtención de la precipitación en las zonas de interés, obtención de la precipitación total para el tiempo de retorno determinado, precipitación de diseño, obtención de las abstracciones en la cuenca hidrográfica y la precipitación efectiva, hidrograma para cada sub cuenca determinada y finalmente la respuesta total mediante el tránsito hidrológico de los hidrogramas obtenidos.

3.1. Zona de estudio

El área de interés en estudio, son las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del Río Cachi, de todas las variables meteorológicas registradas por las estaciones, solamente las precipitaciones acumuladas en intervalos de 24 horas son requeridas en el presente trabajo. De esta forma, se dispone de una amplia base de datos de precipitaciones acumulados de las estaciones meteorológicas seleccionadas dentro de la cuenca del Río Cachi; la ubicación de las estaciones seleccionadas se realiza de acuerdo a lo consignado del *Mapa de Ubicación de Estaciones Climatológicas* distribuido por la *Autoridad Nacional del Agua (ANA)*, las precipitaciones acumuladas para un día se

obtienen desde el *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)*.

3.2. Información Básica

Con fines del estudio a nivel de hidrología son necesarias la disposición de la información siguiente: carta geográfica nacional(modelo digital de elevaciones y de usos de suelo), punto de aforo, imágenes satelitales.

3.2.1. Cartográfica

A nivel de planos cartográficos, son básicamente las *Cartas Nacionales* del *Instituto Geográfico Nacional(IGN)*. En la obtención de calidad de precisión en la delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Cachi, que influye en la zona de estudio del proyecto, se utilizó cuadrángulos mostrados en la Tabla 3.1, en concordancia al *Cuadro de Empalmes* de la *Carta Nacional*.

Tabla 3.1: Cuadrantes contenidos por la cuenca del Río Cachi

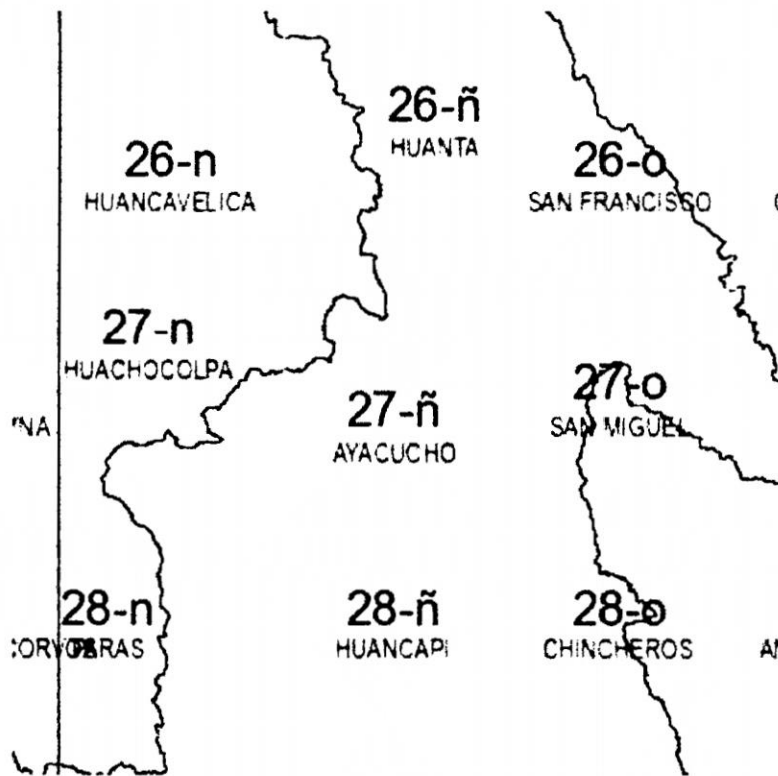
Cuadrángulo	Descripción
26n	Huancavelica
26ñ	Huanta
26o	San francisco
27n	Huachocolpa
27ñ	Ayacucho
27o	San Mguel
28n	Paras
28ñ	Huancapi
28o	Chincheros

En el gráfico 3.1, se muestra la ubicación de los cuadrángulos utilizados y que se encuentran dentro del área de influencia de la cuenca del Río Cacho.

3.2.2. Imágenes satelitales

El proyecto dispone de imágenes obtenidas mediante el uso del aplicación Google Earth y Esri Explorer, los cuál son fuentes de almacenamiento de vistas satelitales, para una mejor definición de extensión de la zona de estudio y la ubicación de las estaciones de registro de las precipitaciones. La delimitación de la cuenca del Río Cachi se encuentra mostrada en la Figura 3.2.

Figura 3.1: Cuadrantes de acuerdo al cuadro de empalmes de la carta nacional



Fuente: Adaptado desde el cuadro de Empalmes de la Carta Nacional de Perú

3.3. Propiedades requeridas de la cuenca

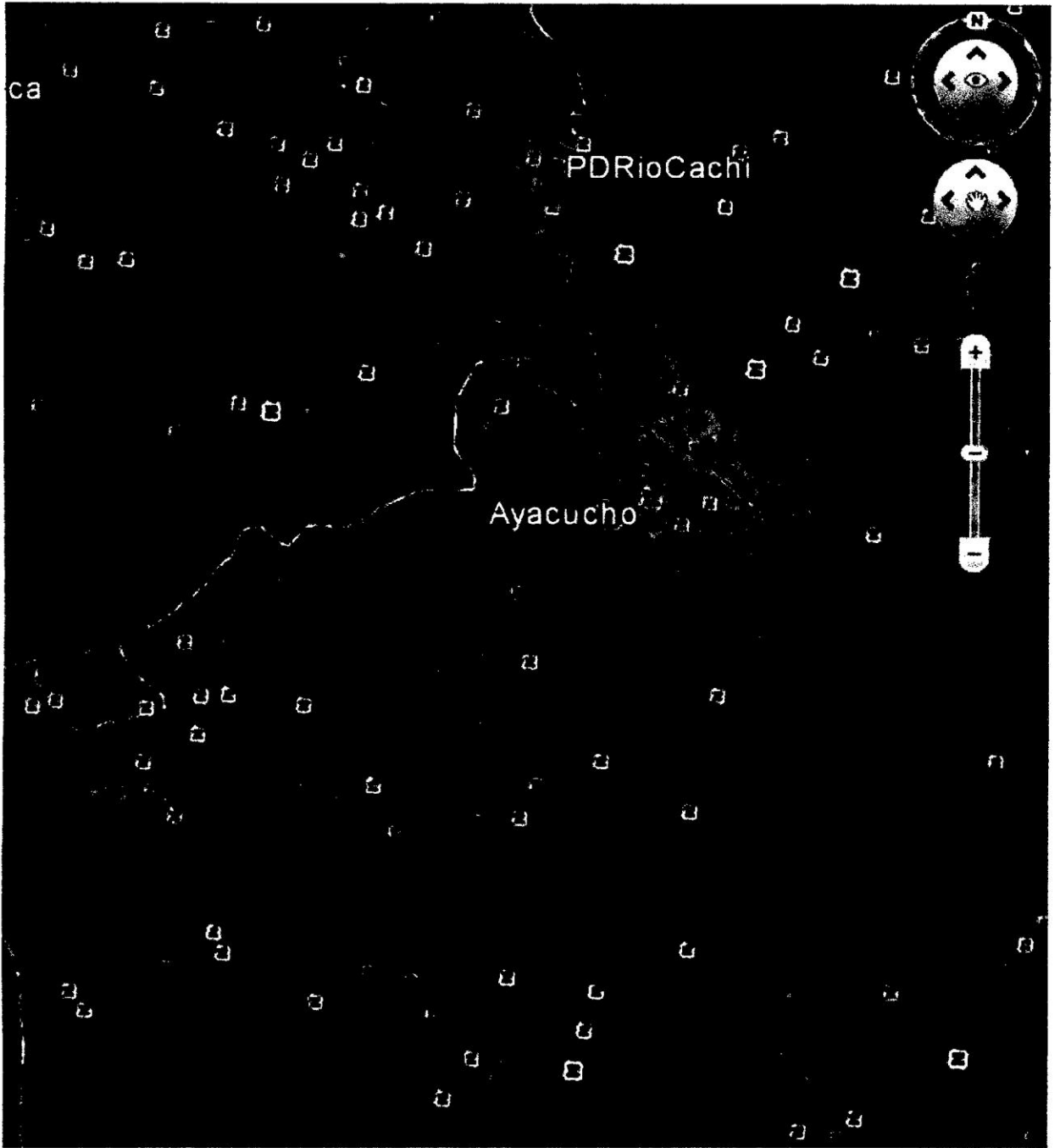
Con fines del estudio hidrológico y teniendo en cuenta que los modelos de transformación de la precipitación en escorrentía se encuentran restringidos a superficies máximas para su aplicación, se subdivide la cuenca de aplicación y las propiedades necesarias para el estudio a nivel de hidrología se obtiene para cada uno de ellos.

3.3.1. Sub cuencas

Con la finalidad de realizar un estudio detallado de las propiedades morfométricas, fisiográficas e hidrográficas de la cuenca del río Cachi se sub-división en las siguientes sub cuencas: Río Cachi, Apacheta, Chicllarazo, chillico, Huamanga, Huanta, Huatata, Paccha, sub cuenca Pongora, Vinchos y la sub cuenca Yucaes.

La cuenca integral del río Cachi y los sub cuencas considerados se muestran en los planos del Anexo

Figura 3.2: Cuenca del Río Cachi



Fuente: Adaptado desde Google Earth Pro

3.3.2. Características morfométricas

Las características morfométricas de las sub cuencas consideradas para la cuenca del Río Cachi, se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Propiedades morfométricas sub cuencas del Río Cachi

Sub cuencas	Area km2	Factor de forma	Coef. De Comp.	Factor de circular.	Razón de elong.
Cachi	3609.86	0.19	1.64	0.37	0.49
Apacheta	392.16	0.13	2.23	0.2	0.41
Chicllarazo	623.92	0.26	1.85	0.29	0.58
Chillico	122.03	0.2	1.89	0.28	0.5
Huamanga	325.02	0.16	1.62	0.38	0.45
Huanta	397.55	0.21	1.48	0.46	0.51
Huatata	358.62	0.229	1.83	0.3	0.61
Paccha	238.15	0.17	1.85	0.29	0.47
Pongora	163.18	0.15	2.14	0.22	0.44
Vinchos	246.29	0.12	2.3	0.19	0.39
Yucaes	274.94	0.22	1.75	0.33	0.53

3.3.3. Características fisiográficas

Las características fisiográficas de la cuenca y subcuencas del Río Cachi se ajunta en el Tabla 3.3.

3.3.4. Características hidrográficas

Las características hidrográficas para las sub cuencas del río Cachi queda establecida en la Tabla 3.3.

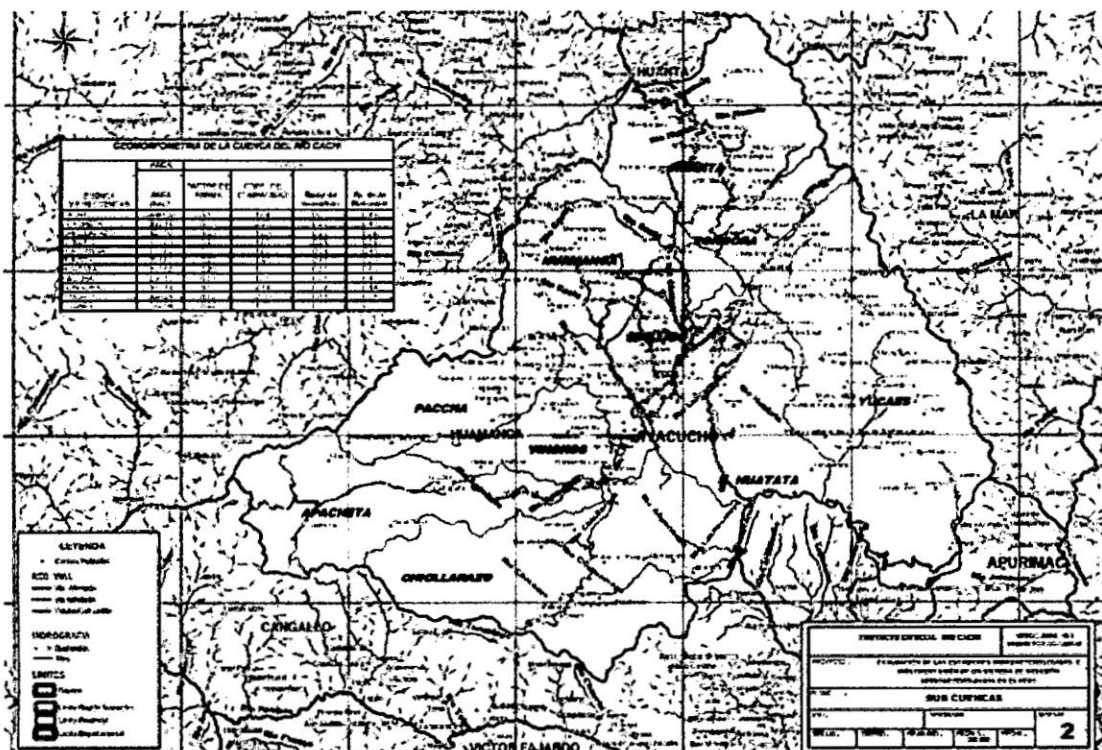
3.4. Registro de precipitaciones

Los registros de las precipitaciones necesarias se obtienen desde las estaciones disponibles en la cuenca del Río Cachi y desde TRMM.

Tabla 3.3: Propiedades fisiográficas e hidrográficas de la cuenca del río Cachi

Sub cuencas	Pendiente	Drenaje		R. equivalente	
		Long. km	Indice drenaje	L km	I km
Cachi	0.02	2968.26	0.82	96.03	77.7
Apacheta	0.029	238.32	0.61	45.78	30.91
Chicllarazo	0.033	450.59	0.72	45.85	35.21
Chillico	0.064	109.59	0.9	20.9	15.91
Huamanga	0.045	266.35	0.82	28.21	23.29
Huanta	0.053	412.7	1.04	28.34	23.8
Huatata	0.05	355.19	0.99	34.38	26.71
Paccha	0.047	181.52	0.76	28.32	21.75
Pongora	0.062	158.25	0.97	28.1	19.62
Vinchos	0.035	214.87	0.76	37.74	24.94
Yucaes	0.03	650.8	0.88	46.91	37.19

Figura 3.3: Sub cuencas del Río Cachi



Fuente: Proyecto Especial Río Cachi

3.4.1. Estaciones con registros en el sitio

La identificación de las estaciones climatológicas existentes en la cuenca del Río Cachi se realiza de acuerdo a lo consignado del *Mapa de Ubicación de Estaciones Climatológicas* distribuido por la *Autoridad Nacional del Agua (ANA)*; luego de su identificación no es posible trabajar con todas las estaciones existentes, principalmente por la no disponibilidad de los registros de las precipitaciones en el rango de tiempo requerido, por tal razón se seleccionó las estaciones mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Cachi

Estación	Tipo	Altitud (m.s.n.m)	Latitud	Longitud
Putacca	PLU	3550.0 msnm	13°23'37"	74°21'13"
Tambillo	PLU	3250.0 msnm	13°12'54"	74°06'19"
Pampa Cangallo	PLU	3350.0 msnm	13°34'09"	74°11'37"
Tunsulla	PLU	3900.0 msnm	13°19'57"	74°34'59"
Cuchoquesera	PLU	3750.0 msnm	13°25'54"	74°20'40"
Allpachaca	PLU	3550.0 msnm	13°23'19"	74°16'00"

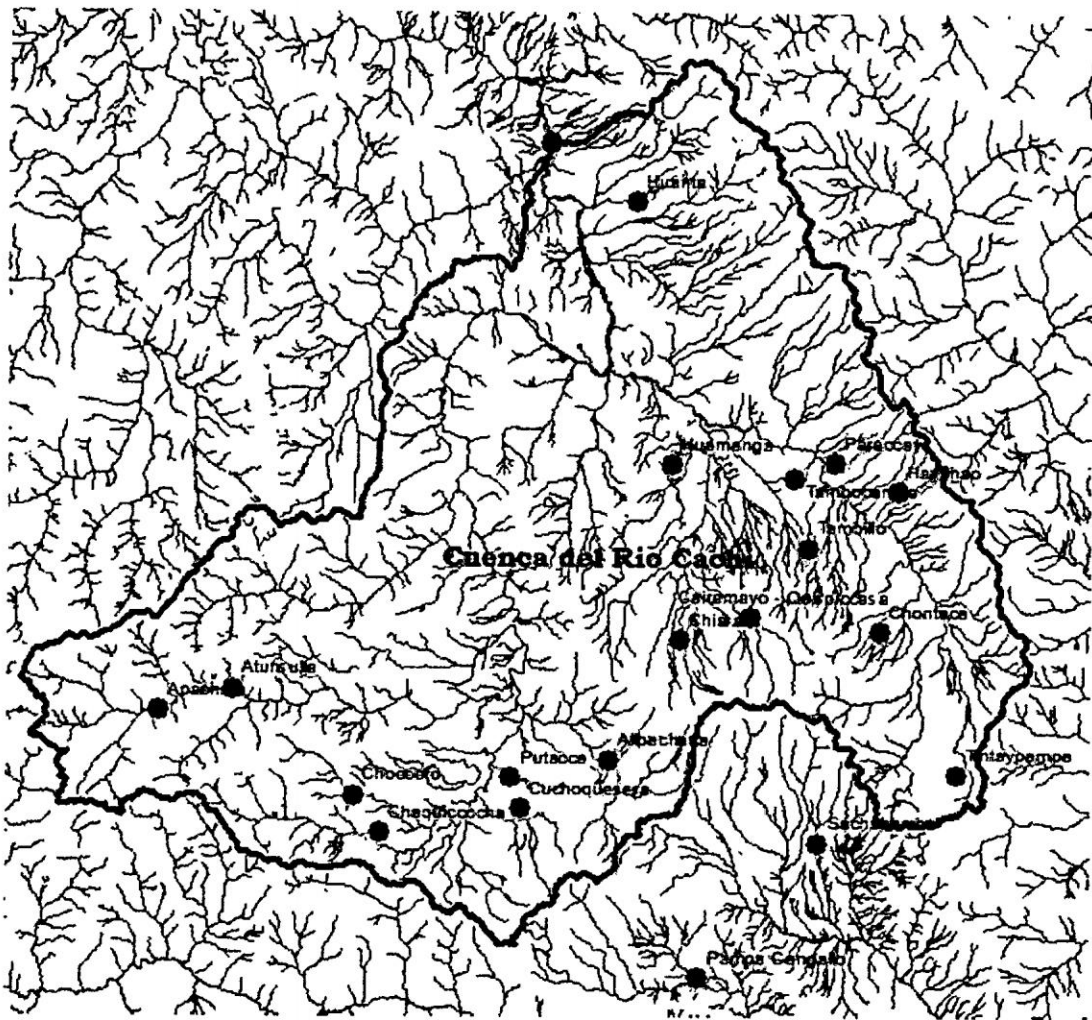
La serie de tiempo formada por las precipitaciones diarias para las estaciones seleccionadas se obtienen desde la página web: <http://www.ana.gob.pe/> de la *Autoridad Nacional del Agua (ANA)* y desde la dirección: <http://www.senamhi.gob.pe/> correspondiente al *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)*. El registro de datos obtenidos se encuentran debidamente organizados en los Anexos al presente documento, para su consulta.

3.4.2. Registro de precipitaciones en estaciones sintéticas

Por otra parte, se crean estaciones sintéticas sobre la cuenca del Río Cachi en las mismas ubicaciones de las estaciones seleccionadas en la Tabla 3.4; de esta forma, con la finalidad de identificar a las estaciones creadas, simplemente se le añade la palabra *sintética* al inicio del nombre de la estación referida, así se tienen: estación sintética Putacca, estación sintética Pampa Cangallo, etc.

Es para estas estaciones sintéticas, que se corresponden en ubicación a las estaciones seleccionadas mostradas en la Tabla 3.4, se obtienen los registros históricos de precipitaciones desde *TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)*, considerando el mismo intervalo de tiempo de las estaciones reales. Desde la base de datos del proyecto TRMM es posible obtener información en la forma usual de series de tiempo o en archivos tipo raster para su tratamiento en sistemas de información geográfica, en este trabajo se

Figura 3.4: Estaciones meteorológicas ubicadas en la Cuenca del Río Cachi



obtiene la información en un formato de series de tiempo del producto derivado 3B42 V7 (Daily TRMM and Other Rainfall Estimate¹), la serie de tiempo obtenida para cada estación sintética se encuentra en los Anexos.

3.5. Análisis de homogeneidad y consistencia

Para los datos de series de tiempo, las pruebas de homogeneidad establecen la correspondencia entre la muestra y una única población, es decir, que las propiedades estadísticas de la muestra (promedio, varianza, desviación estándar, etc.) guarden correspondencia con las propiedades de la población; la prueba es necesaria y fundamental debido que los datos (la muestra) es obtenida en un periodo determinado y su existencia es en todo el tiempo (la población, el universo - desde donde se obtiene la muestra).

Para el análisis de la homogeneidad de registro de datos en el tiempo, se cuenta, entre otros, con los siguientes pruebas estadísticas: test de Helmert, prueba estadística de las secuencias, prueba de la t de Student, test de Cramer, test de Wald - Woldowitz y las técnicas de la curva masa doble.

3.5.1. Estación Putacca

El registro de las precipitaciones a nivel anual de la *Estación Putacca* queda establecida en la tercera columna de la Tabla 3.5, el análisis de la homogeneidad de ésta serie se realiza mediante la *Prueba Estadística de Helmert*, la misma que consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio; si el evento es mayor que el promedio le corresponde un signo + y si dicho evento es menor que la media se le asigna el signo -; luego, si una desviación de un determinado signo es seguido por el mismo signo se crea una secuencia S , en cambio, si una desviación con un determinado signo es seguido por una desviación de signo contrario se registra un cambio C , cada año, excepto el primero, generarán una secuencia o un cambio. Si la serie es homogénea el número de secuencias S y el número de cambios C deben ser iguales, cuya diferencia será nula (cero), esto no suele suceder con frecuencia y se considera dentro de los límites de un error probable y depende, como debe ser, del tamaño del registro (n) y está dado por:

¹Para descargar información desde TRMM - precipitaciones diarias - desde la siguiente dirección: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/tovas>

$$-\sqrt{n-1} \leq S - C \leq \sqrt{n-1} \quad (3.1)$$

El procedimiento es el siguiente: se obtiene el promedio de la serie analizada, en este caso el promedio es $901.0mm$, el promedio es comparado con cada uno de los eventos asignando el signo $-$ o $+$ dependiendo si el evento es mayor o menor al promedio, respectivamente; se cuenta el número de secuencias y cambios para evaluar la homogeneidad de la serie de acuerdo a la Ecuación 3.1.

La evaluación de la homogeneidad mediante el *Test de Helmert* se muestra en la Tabla 3.5 y cuyas precipitaciones registradas por la *Estación Putacca* es homogénea, dado que: $-3.6 \leq 1 \leq 3.6$

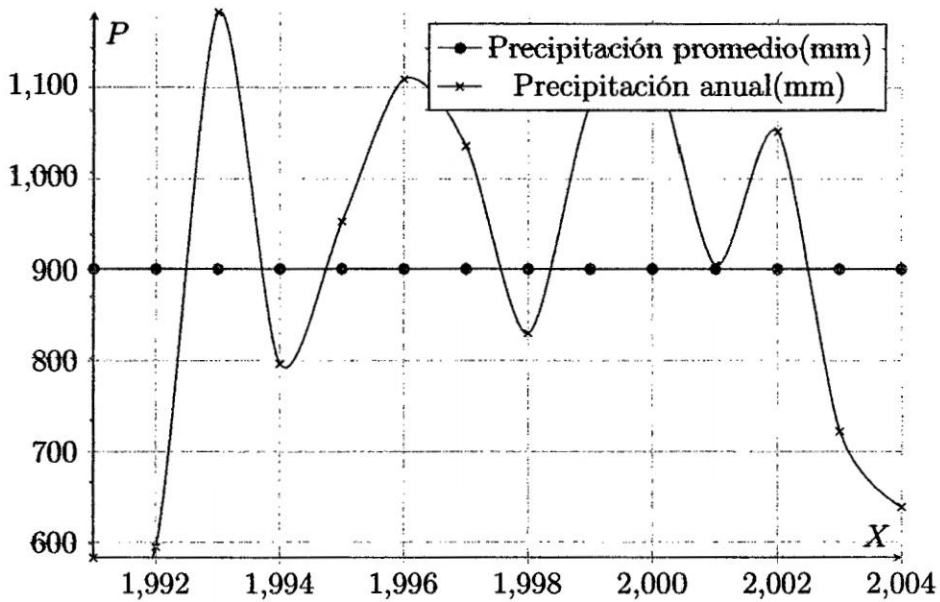


Figura 3.5: Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Putacca

Tabla 3.5: Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Putacca

Nro	Año	Precipitación Anual (mm)	Test de Helmert	
1	1991	582.90	+	
2	1992	595.10	+	S
3	1993	1,182.60	-	C
4	1994	796.60	+	C
5	1995	953.20	-	C

Continued on next page

Tabla 3.5 – Continued from previous page

Nro	Año	Precipitacion Anual (mm)	Test de Helmert	
6	1996	1,109.30	-	S
7	1997	1,036.20	-	S
8	1998	830.40	+	C
9	1999	1,082.20	-	C
10	2000	1,127.00	-	S
11	2001	905.36	-	S
12	2002	1,051.90	-	S
13	2003	722.00	+	C
14	2004	638.87	!	S

3.5.2. Estación Cuchoquesera

El registro de la precipitación de la *Estación Cuchoquesera* es homogénea, analizada de acuerdo al *Test de Helmert*, se dispone de un número de registros de 13 años y se obtiene igual número de secuencias y cambios; las precipitaciones a nivel anual y el proceso del análisis de la homogeneidad muestra la Tabla 3.6.

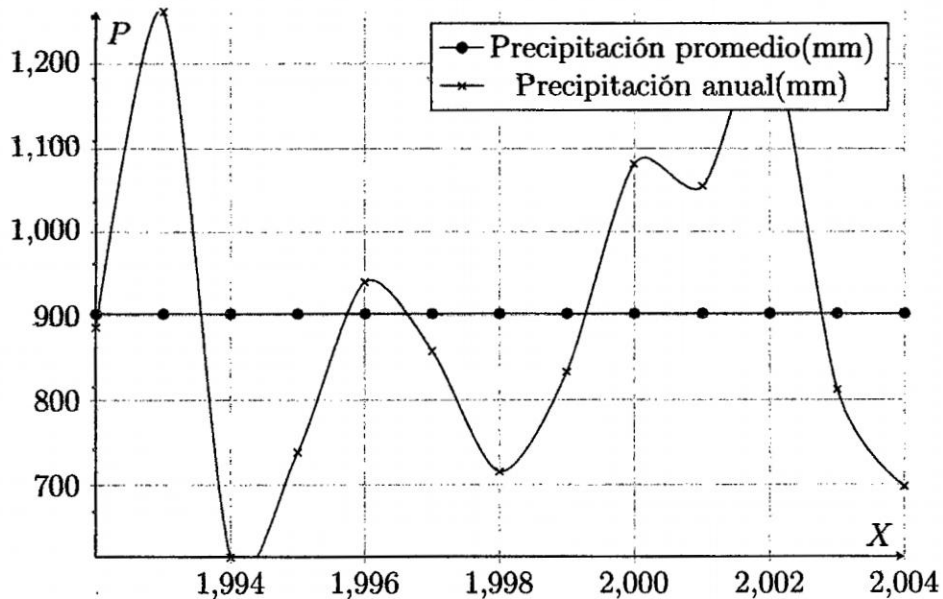


Figura 3.6: Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Cuchoquesera

Tabla 3.6: Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Cuchoquesera

Nro	Año	Precipitacion Anual (mm)	Test de Helmert	
1.0	1992	886.2	+	
2.0	1993	1261.5	-	C
3.0	1994	615.7	+	C
4.0	1995	738.9	+	S
5.0	1996	940.0	-	C
6.0	1997	857.7	+	C
7.0	1998	715.8	+	S
8.0	1999	833.3	+	S
9.0	2000	1081.2	-	C
10.0	2001	1054.5	-	S
11.0	2002	1231.5	-	S
12.0	2003	812.4	+	C
13.0	2004	698.2	+	S

3.5.3. Estación Allpachaca

Se dispone de un registro de la precipitación de 13 años, la serie evaluada en concordancia al *Test de Helmert* es homogénea y el procedimiento y resultado muestra la Tabla 3.7, se obtiene igual número de secuencias y cambios.

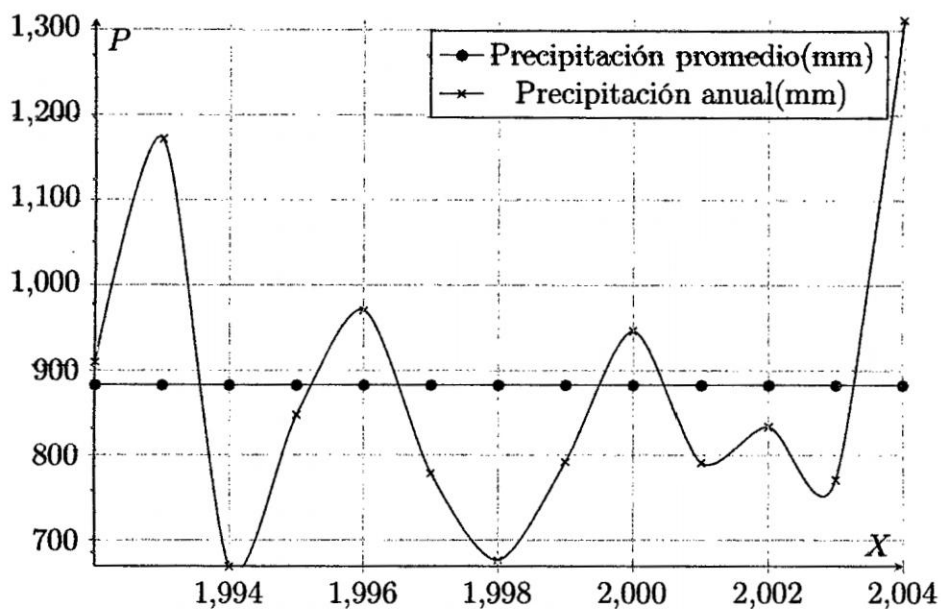


Figura 3.7: Precipitación promedio anual y precipitación anual estación Allpachaca

Tabla 3.7: Test de Helmert para el registro de la precipitación anual en la estación Allpachaca

Nro	Año	Precipitacion Anual (mm)	Test de Helmert	
1.0	1992	909.40	-	
2.0	1993	1171.80	-	S
3.0	1994	669.20	+	C
4.0	1995	847.30	+	S
5.0	1996	970.60	-	C
6.0	1997	779.20	+	C
7.0	1998	676.70	+	S
8.0	1999	792.40	+	S
9.0	2000	946.50	-	C
10.0	2001	791.60	+	C
11.0	2002	833.80	+	S
12.0	2003	771.20	+	S
13.0	2004	1312.20	-	C

3.5.4. Estaciones sintéticas TRMM

Los datos registrados con el satélite TRMM durante el periodo 1998 – 2012 se someten al respectivo análisis de la homogeneidad, cuyo proceso muestra la Tabla 3.8, donde queda establecida la homogeneidad de la serie. La Figura 3.8 muestra la variación de la precipitación anual respecto de su promedio para la estación sintética TRMM Putacca - cuyos datos fueron obtenidos desde el satélite TRMM para el punto de ubicación de la estación Putacca.

Tabla 3.8: Test de Helmart para el registro de la precipitación anual en la estación sintética TRMM Putacca

Nro	Año	Precipitacion Anual (mm)	Test de Helmert	
1	1998	805.79	+	
2	1999	843.41	+	S
3	2000	894.82	+	S
4	2001	951.08	-	C
5	2002	971.22	-	S
6	2003	874.30	+	C
7	2004	813.28	+	S
8	2005	752.22	+	S
9	2006	959.83	-	C
10	2007	779.70	+	C
11	2008	752.63	+	S
12	2009	738.74	+	S
13	2010	665.78	+	S
14	2011	970.24	-	C
15	2012	851.0	+	C

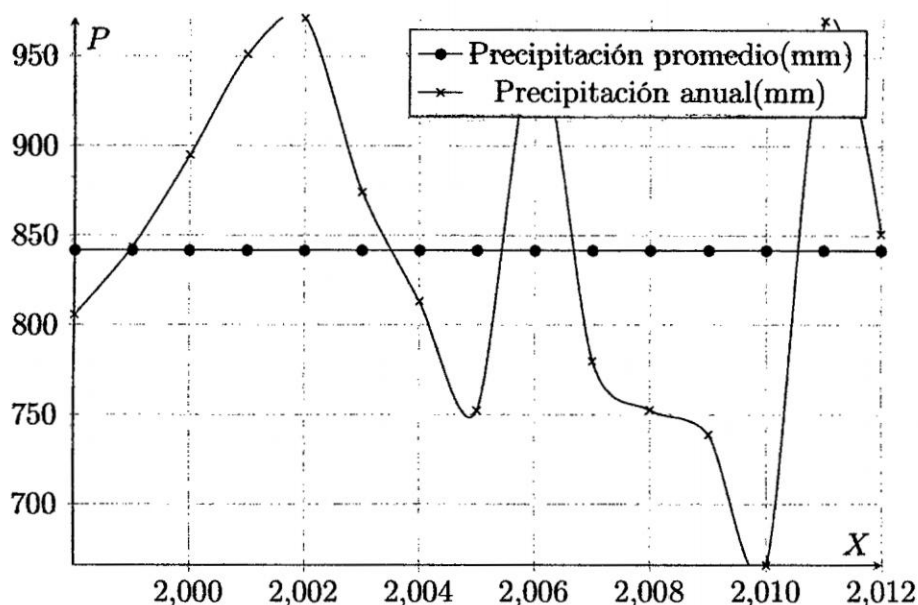


Figura 3.8: Precipitación promedio anual y precipitación anual estación sintética TRMM Putacca

El periodo de datos disponibles del registro de precipitaciones de las estaciones climáticas seleccionadas (Allpachaca, cuchoquesera y Putacca) es desde el año 1992 hasta el año 2004; y los registros del satélite TRMM (producto 3B42) se encuentran disponibles desde de enero de 1998 hasta la actualidad; luego, el periodo de tiempo seleccionado para la validación de los datos de lluvia es desde el año 1998 hasta el año 2004, intervalo de tiempo definido por la disponibilidad de los registros de la precipitación TRMM y estaciones climáticas. Además, se considera que la incertidumbre de las precipitaciones diarias medidas en las estaciones meteorológicas es menor a los obtenidos mediante TRMM.

La precipitación obtiene desde TRMM, para el punto: latitud 1325'54" sur y longitud 7420'40" oeste, para todos los días del mes de enero del año 2000; se dispone del registro de las precipitaciones diarias para el mismo intervalo de tiempo, Figura 3.9.

La Figura 3.10 muestra el registro de las precipitaciones en 24 horas de la estación Cuchoquesera y la Estación sintética TRMM - Cuchoquesera. Luego, dado que el registro de TRMM será utilizado como una estación sintética en áreas donde no se dispone de registros directos, se obtendrá un modelo meta heurístico basado en Redes Neuronales Artificiales, un modelo cuyos valores de ingreso son los valores obtenidos del TRMM y los resultados serán los registros obtenidos a nivel del suelo, en este caso de la Estación Cuchoquesera, luego de obtener un modelo meta heurístico adecuado las precipitaciones pueden ser obtenidos en otros puntos del área de interés.

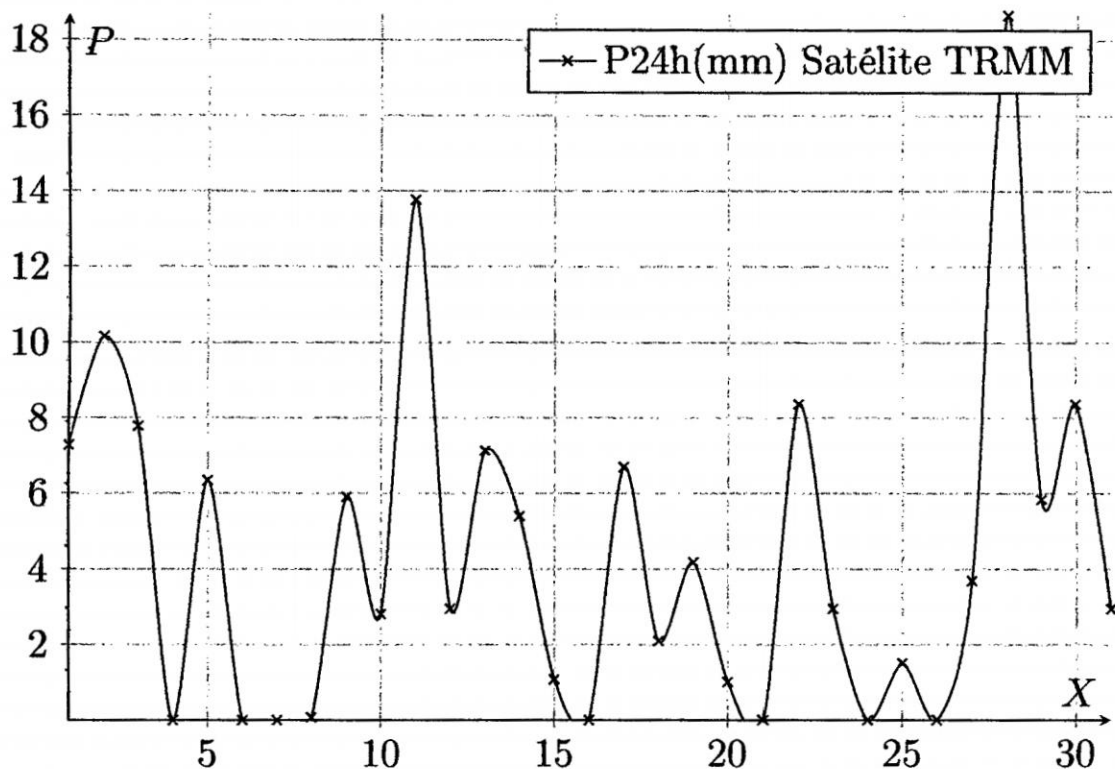


Figura 3.9: P24h estación estación sintética Cuchoquesera - TRMM

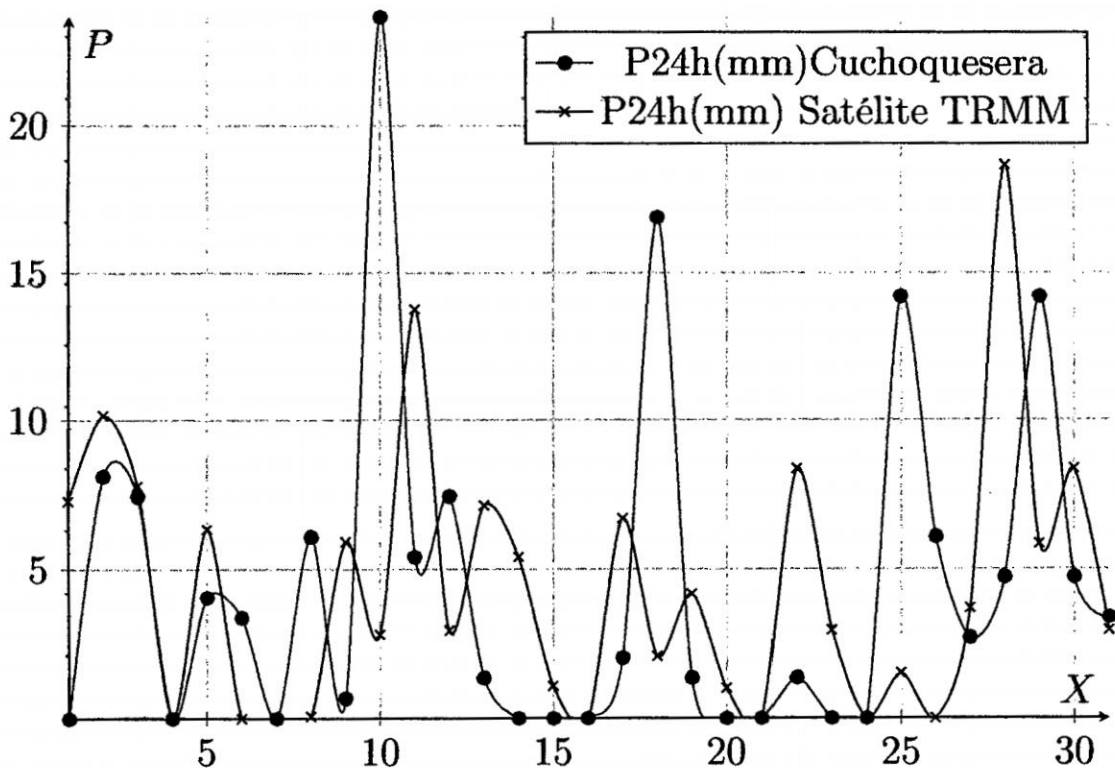


Figura 3.10: Variación de la precipitación TRMM - Estación Cuchoquesera

Desde la Figura 3.10 se observa que no existe una relación única entre los registros diarios obtenidos desde TRMM y la estación Cuchoquesera; la Figura 3.11 representa la relación en abscisas la precipitación TRMM y en ordenadas la precipitación de la estación cuchoquesera, encontrar una relación entre estas dos precipitaciones es posible mediante una relación.

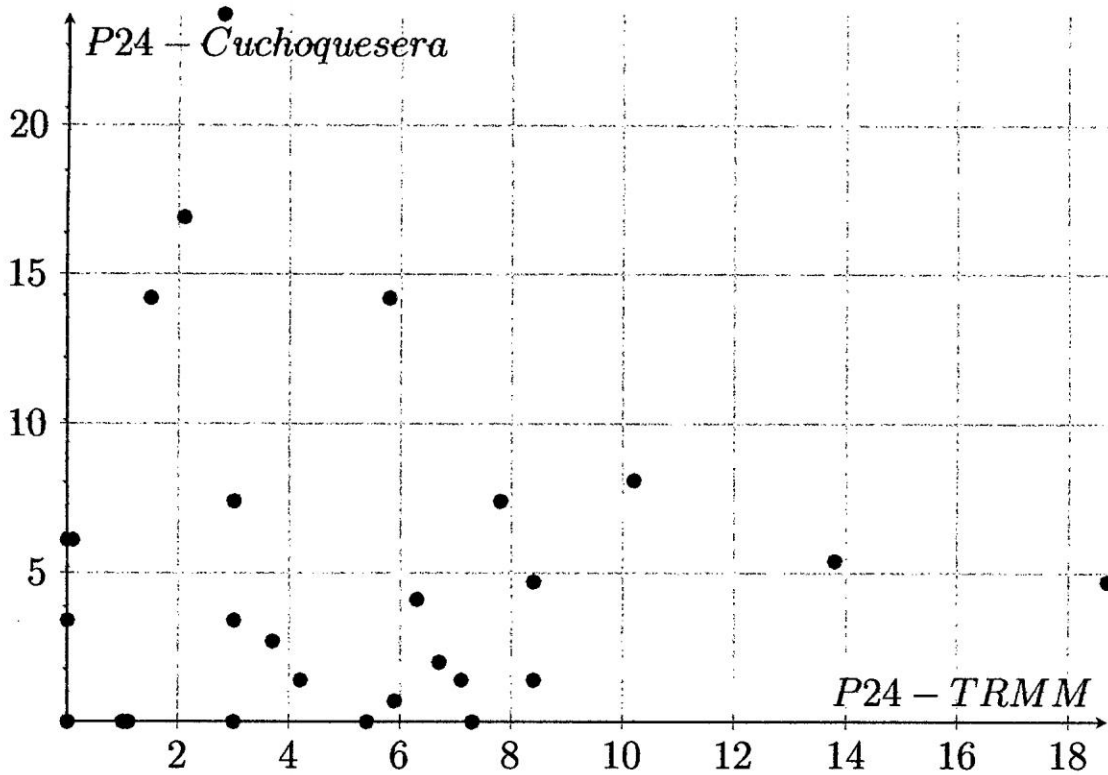


Figura 3.11: Estaciones sintética TRMM y Cuchoquesera

3.6. Precipitaciones registradas en el sitio y TRMM

Se busca una relación entre las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas y las disponibles del TRMM, mediante la siguiente relación:

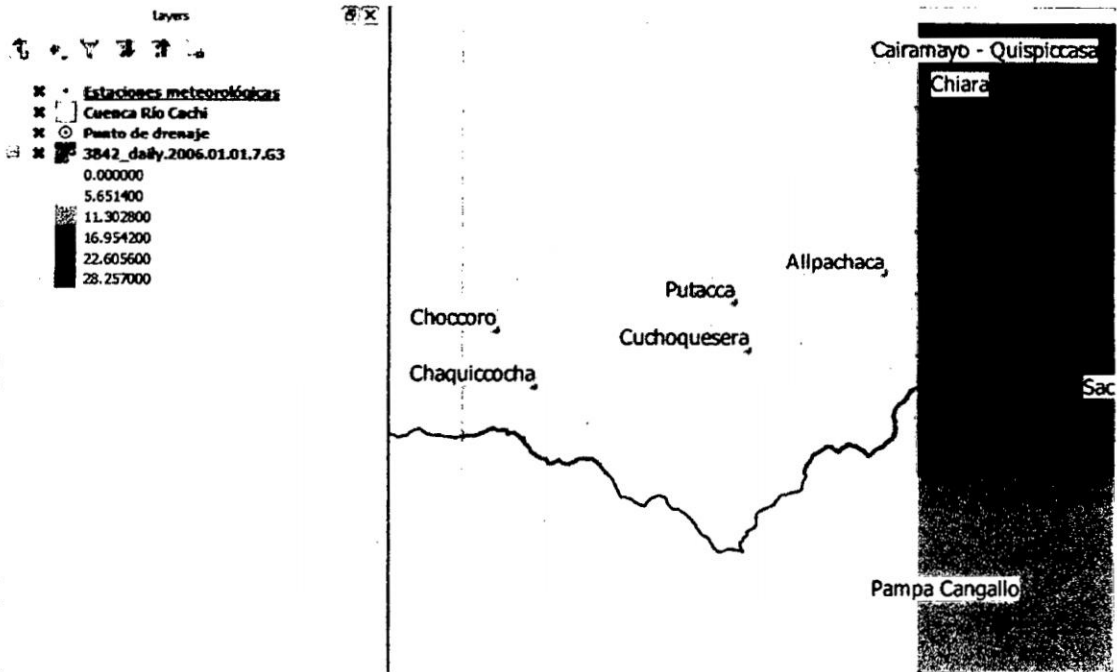
$$P_{est} = a + b(Alt) + c(X) + d(Y) + e(P_{trmm}) \quad (3.2)$$

Donde: a variable independiente, Alt altitud, X y Y ubicación de la estación meteorológica, P_{trmm} precipitación TRMM. Mediante una regresión lineal múltiple se obtiene el modelo:

$$P_{est} = 0.6854 + 0.00123(Alt) + 0.0(X) + 0.0(Y) + 0.964(P_{trmm}) \quad (3.3)$$

Relación que solamente toma en cuenta la altitud y la precipitación TRMM. Cons esta relación se obtiene las precipitaciones en las subcuencas sin registros de precipitaciones. ($R^2 = 0.6524$)

Figura 3.12: Ubicación de las estaciones en una celda del TRMM



La Figura 3.12 muestra la relación existente entre una celda del archivo tipo raster obtenido desde TRMM y las estaciones meteorológicas identificadas, mientras la Figura 3.13 muestra los datos obtenidos de la ubicación de las estaciones meteorológicas y las precipitaciones diaria máxima anual, a partir de los registros establecidos mediante una regresión lineal múltiple se obtiene la Ecuación 3.3.

La Figura 3.14, muestra la relación existente entre la cuenca del Río Cachi, punto de aforo, las estaciones meteorológicas y el registro del proyecto TRMM (la precipitación acumulada diaria) en milímetros para el día 01 de enero de 2006, éste archivo es obtenido desde la base de datos del proyecto TRMM, los archivos se obtienen desde la siguiente dirección <http://pmm.nasa.gov/trmm>

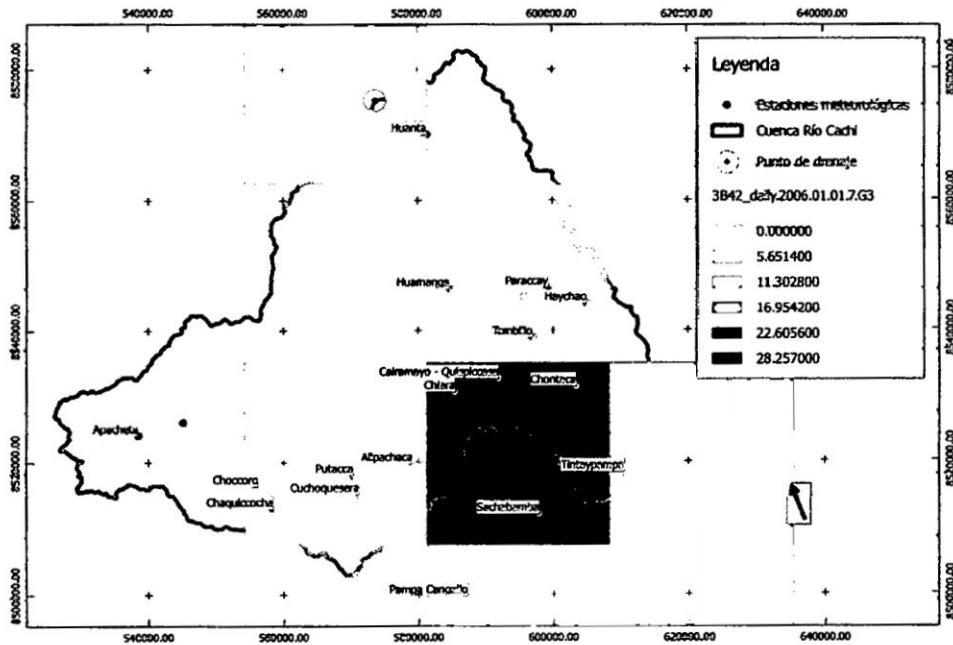
3.7. Caudales de máxima avenida

En esta sección se obtienen los caudales de máxima avenida para cada sub cuenca y la cuenca total del Río Cachi, el proceso detallado del análisis estadístico de la precipitación, transformación de la precipitación, obtención de las abstracciones, la determinación de la precipitación efectiva y los caudales de máxima avenida, se muestran detalladamente en los documentos consignados en los anexos de la presente tesis.

Figura 3.13: Relación de las precipitaciones

Estaciones	Año	Pmáx(24horas) annual en mm por día	X(m)	Y(m)	Altura (msnm)	Precipitación TRMM, en mm por día
Putacca	1997	43.4	570.338.05	8,518.037.15	3,589.00	42.77
Tambillo	1997	41.7	596.944.25	8,538.914.99	3,250.00	53.69
Sachabamba	1997	51.7	597.870.00	8,512.090.45	3,566.00	42.77
Pampa Cangallo	1997	29.8	587.244.93	8,499.776.83	3,350.00	45.5
Huamanga	1997	22.2	584.717.03	8,546.421.27	2,772.00	45.5
Atunsuña	1997	34.3	545.153.43	8,526.056.00	3,900.00	50.05
Cuchoquesera	1997	28.4	571.194.11	8,515,148.30	3,740.00	52.78
Alpachaca	1997	26.1	579.163.58	8,519.746.44	3,550.00	39.13
Chiara	1997	23.7	585.463.92	8,530.619.92	3,599.00	53.69
Chontaca	1997	35.6	603.447.43	8,531,425.24	3,525.00	45.5
Tintaypampa			610,465.81	8,518,431.87	4,125.00	51.87
Choccoro			556,198.28	8,516,374.80	4,061.00	45.5
Apacheta			538,492.76	8,524,116.26	3,550.00	46.41
Caramayo - Quispiccasa			591,896.36	8,532,665.18	3,585.00	50.05
Chilicruz - Tranka			581,018.44	8,459,518.99	2,620.00	49.14
Tambobamba			595,732.20	8,545,186.68	3,050.00	54.6
Haychao			605,001.24	8,544,138.71	3,225.00	37.31
Huanta			581,354.78	8,570,117.50	2,620.00	52.78
Paraccav			599,289.94	8,546,587.21	2,900.00	47.32

Figura 3.14: Archivo TRMM, cuenca del río Cachi y estaciones meteorológicas



Fuente: elaboración propia

3.7.1. Análisis estadístico de la precipitación

Debido que no se dispone de los registros de las precipitaciones en largos periodos de tiempo y todo proyecto se plantea siempre en un futuro próximo, es necesario disponer la información de las variables requeridas para un tiempo de retorno considerado, el tiempo de retorno en la hidrología e hidráulica se asocia a la importancia de los proyectos o trabajos planeados.

Tabla 3.9: Precipitaciones para 100 años de tiempo de retorno

Sub Cuencas	Pt(mm)
Apacheta	63.9119118
Chicllarazo	61.635242
Chillico	62.8424638
Huamanga	53.1955058
Huanta	61.611665
Huatata	46.5576035
Paccha	43.9176657
Pongora	56.1847352
Vinchos	63.9744358
Yucaes	62.6939031

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.9, muestra las precipitaciones de diseño considerando un tiempo de retorno de 100 años, la tendencia de los registros de las precipitaciones máximas diarias anuales se evalúa con distintas distribuciones teóricas: distribución normal, logarítmico normal, etc.

3.7.2. Número de curva

Las abstracciones, comportamiento y característica inherente de las cuencas hidrológicas, determina la cantidad de la precipitación que no se transforma en escorrentía al quedarse detenidas en los charcos, los bosques y por la capacidad de abstracción del suelo mismo, existen distintas metodologías para su evaluación, una de las más extendidas y prácticas se basa en el uso del número de curva.

La Tabla 3.10 muestra los números de curva determinados para las sub cuencas consideradas.

Tabla 3.10: Número de curva determinadas para las subcuencas

Sub Cuencas	NC
Apacheta	76.97
Chicllarazo	82.00
Chillico	76.55
Huamanga	80.81
Huanta	83.75
Huatata	75.81
Paccha	74.65
Pongora	78.79
Vinchos	79.39
Yucaes	81.90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Precipitación efectiva

Sub Cuencas	Pe(mm)
Apacheta	14.7603375
Chicllarazo	23.48345
Chillico	4.59303341
Huamanga	12.2332846
Huanta	14.9632093
Huatata	13.4979402
Paccha	8.96362293
Pongora	6.14186013
Vinchos	9.2700008
Yucaes	10.3483455

Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se transforma directamente en caudal y es la responsable de la crecien de los ríos a causa de las precipitaciones, se define como la precipitación total pero tomando en cuentas las abstracciones de la cuenca; la cantidad de abstracción de las cuencas son particulares y depende del tipo de suelo, de las condiciones de humedad antecedente, de los usos de los suelos y es necesario obtener estos indicadores para determinar adecuadamente los números de curva. La Tabla 3.11 muestra la precipitación efectiva para las sub cuencas consideradas.

3.7.4. Caudal máximo de las subcuencas

Disponiendo de la precipitación efectiva y las propiedades morfométricas (área, perímetro, longitud de cauce principal, pendiente del cauce principal, etc.) se obtiene el hidrograma para la precipitación de diseño considerado, esta hidrograma es determinado considerando solamente la precipitación, es necesario añadir el caudal base para representar adecuadamente el hidrograma de la cuenca analizada.

Tabla 3.12: Caudal de máxima avenida de las subcuencas

Sub Cuencas	Qmax(m3s)
Apacheta	291.228706
Chicllarazo	463.34636
Chillico	90.6228045
Huamanga	241.368712
Huanta	295.231467
Huatata	266.320988
Paccha	176.856682
Pongora	121.181916
Vinchos	182.901668
Yucaes	204.177939

La Tabla 3.12 muestra el pico del caudal debido a las precipitaciones de diseño consideradas para cada sub cuenca.

3.7.5. Caudal máximo de la cuenca del Río Cachi

Desde los hidrogramas obtenidos para cada sub cuenca componente de la Cuenca del Río Cachi, el hidrograma total, la respuesta total de la cuenca se obtiene mediante un tránsito hidrológico de los hidrogramas de las sub cuencas obtenidas. De ésta manera se determina un caudal máximo de $2347.43m^3/s$.

Capítulo 4

Análisis y discusión de los resultado de la tesis

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos, se contrastarán los resultados para sub cuencas específicas de la cuenca del Río Cachi, para ello se dispone [32] de los resultados del Informe Final del *ESTUDIO A NIVEL DE FACTIBILIDAD PARA LA ACTUALIZACION Y REFORMULACION DEL ESQUEMA HIDRAULICO CONSIDERANDO OPTIMIZACION DEL RECURSO HIDRICO DEL PERC*, estudio efectuado por el Consorcio *Adez Ingenieros Contratistas S.R.L. - Agua Agro Asesores Asociados S.A.C.* para el entonces *Proyecto Especial Río Cachi*, en el año 2006, el análisis y la discusión de los resultados es a nivel de los hidrogramas de máximas avenidas obtenido en determinados puntos de captación del sistema hidráulico PERC.

4.1. Estructuras de captación seleccionadas

Para la contrastación de los resultados se seleccionan los puntos de captación del sistema hidráulico PERC, toda la información se obtiene desde la referencia [32]; la información de las obras de captación seguidamente descritas fueron tomados desde dicho informe, la referencia [rcachi]; la Figura 4.1 muestra la ubicación de las estructuras de captación, la Tabla 4.1 contiene los puntos de ubicación de las estructuras hidráulicas consideradas.

4.1.1. Bocatoma Churiacc

Ubicado en la quebrada Churiacc en la cota 4,172 msnm., y dada la pendiente relativamente fuerte de la quebrada en este tramo (alrededor de 7%) y el caudal a captarse

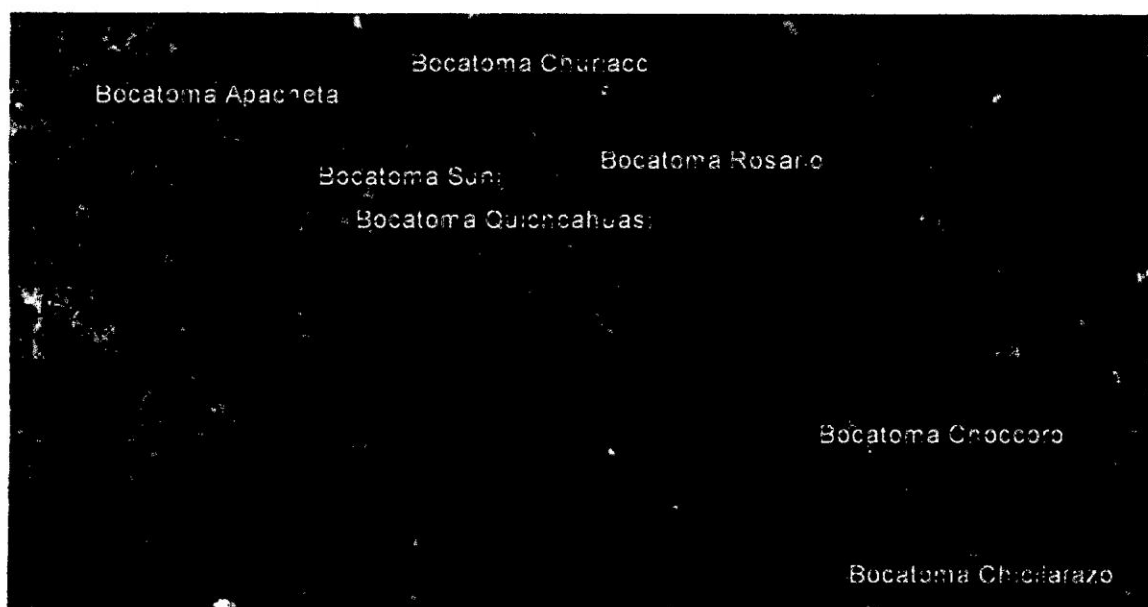


Figura 4.1: Esquema de la ubicación de las estructuras de captación (figura adaptada desde Google Earth)

de solo $0.64 \text{ m}^3/\text{s}$, se ha construido una bocatoma tipo caucasiana. Los muros de encauzamiento tienen una altura de 1.74m , diseñada para evitar que una máxima crecida de un período de retorno de 15 años no rebase los muros. Dispone de dos compuertas, una de captación y otra de limpia.

Tabla 4.1: Ubicación de las captaciones(sistema de ubicación UTM, DATUM: WGS 1984, Huso: 18, Zona: L)

Bocatoma	latitud (m)	longitud(m)
Bocatoma Churiacc	8525469.43	539563.37
Bocatoma Apacheta	8524074	538409
Bocatoma Quichcahuasi	8522465	544134
Bocatoma Suni	8522656	544519
Bocatoma Rosario	8523750	546686
Bocatoma Choccoro	8516373	556172
Bocatoma Chichlarazo	8511946	558323

Fuente: elaboración propia

4.1.2. Bocatoma Apacheta

Ubicado en el río Apacheta en la cota $4,153.00\text{msnm}$, consta de un barraje fijo de perfil Creager y otro móvil, el primero de 10.0m y el segundo de 3.60m de longitud. El barraje móvil está constituido por dos compuertas de $1.20 \times 1.20\text{m}$, una para el desripador y

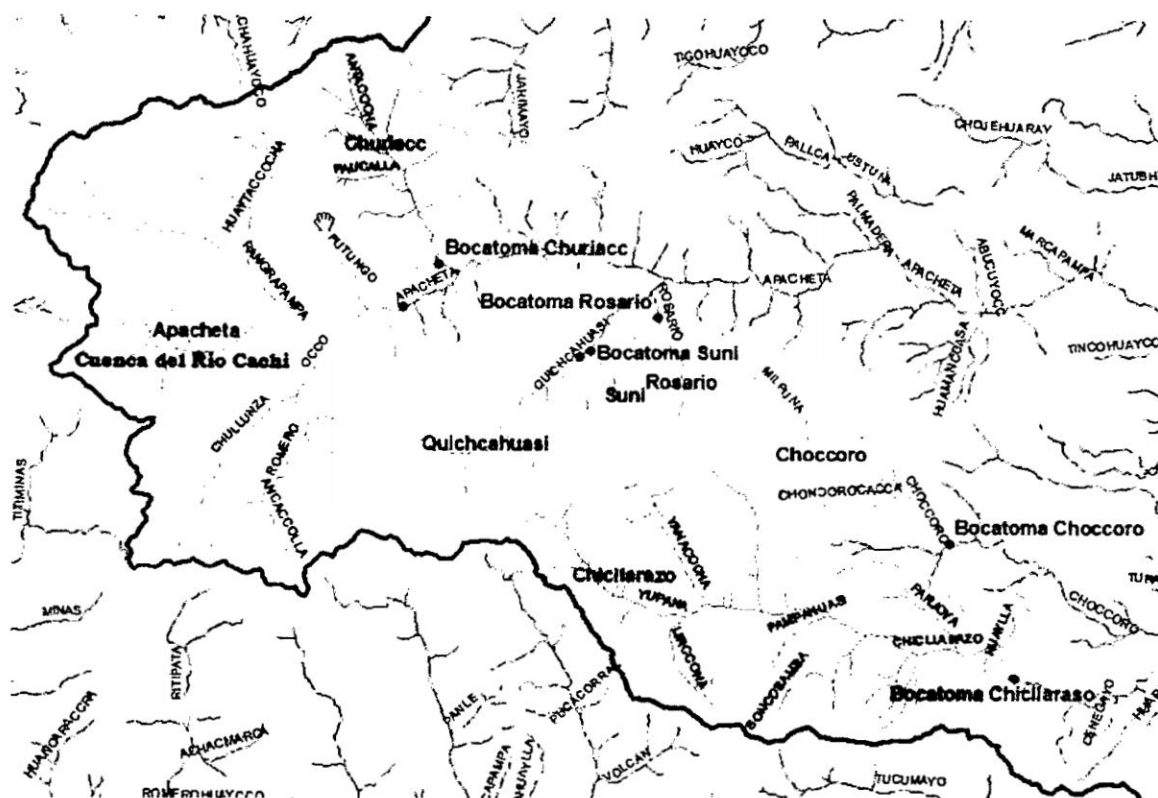


Figura 4.3: Sub cuencas delimitadas para cada obra de captación considerada (Adaptado desde ArcGIS)

máximas crecidas; el caudal a captarse es de $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$., tiene desarenador y aliviadero de demasías. La bocatoma es de concreto.

4.2. Parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica y la red hídrica

Las obras hidráulicas seleccionadas con la finalidad de contrastar el caudal de máximas avenidas, son: bocatoma Churiacc, bocatoma Apacheta, bocatoma Choccoro y la bocatoma Chicllarazo. La Figura 4.3 muestra la delimitación de las sub cuencas para cada punto de interés, el punto de aforo coincide con la ubicación de las obras hidráulicas de captación, cuyas coordenadas en el sistema UTM se muestra en la tabla 4.1. Los parámetros morfométricos de cada sub cuenca hidrográfica y los parámetros de la red hídrica son obtenidos solamente las necesarias, las mismas que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades morfométricas de las sub cuencas y la red hídrica

Cuenca	Area (Km2)	Perimetro (km)	Pendiente promedio de la cuenca %	Longitud del caude principal (km)	Pendiente del cauce principal %
Churiacc	29.10	24.60	7.24	8.48	8.21
Suni	4.10	8.98	26.35	2.90	22.43
Rosario	8.01	12.23	32.56	4.53	18.56
Choccoro	27.83	25.17	11.23	13.25	9.82
Quichcahuasi	36.70	27.06	23.58	10.82	8.73
Apacheta	136.69	59.64	6.54	13.25	7.84
Chicllarazo	623.92	549.22	7.85	450.59	8.22

Elaboración propia

4.3. Precipitación de diseño

Las precipitaciones de diseño, considerando un tiempo de retorno de 308 años - tomando en cuenta la referencia [32] se muestra en la tabla 4.3 para cada sub cuenca.

Tabla 4.3: Precipitación de diseño

Cuenca	P24 (mm)
Acchima huaycco	74.34
Apacheta	112.27
Chalhuamayo	67.84
Chicllarazo	98.11
Choccoro	94.63
Churiacc	105.81
Jeullamayo	81.91
Llachocchuaycco	84.32
Quichcahuasi	110.8
Rosario	104.07
Suni	105.7

Fuente: referencia [32]

La precipitación de diseño obtenido a partir de los registros disponibles y para el tiempo de retorno establecido por el informe *Estudio a nivel de factibilidad para la actualización y formulación del esquema hidráulico considerando optimizan del recurso hídrico del PERC* - referencia [32], se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Precipitación de diseño obtenido

Cuenca	P24 (mm)
Churiacc	118.52
Apacheta	116.32
Choccoro	105.84
Chicllarazo	105.84

Fuente: Elaboración propia

4.4. Caudal máximo

El caudal máximo para las sub cuencas seleccionadas: Churiacc, Apacheta, Choccoro y Chicllarazo, tanto del *Estudio a nivel de factibilidad para la actualización y formulación del esquema hidráulico considerando optimizan del recurso hídrico del PERC* - referencia [32] y los obtenidos mediante procedimientos propios, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Caudales máximos obtenidos para las cuencas seleccionadas

Cuenca	Caudal máximo obtenido por la referencia [32], en m^3/s	Caudal máximo obtenido por cálculos propios, m^3/s
Churiacc	398.73	409.25
Apacheta	407.8	384.45
Choccoro	280.56	272.54
Chicllarazo	205.85	262.5

El proceso de cálculo para la obtención de los caudales finales, el procedimiento detallado se encuentra en los anexos, los cálculos se realizaron para las condiciones establecidas en el *Estudio a nivel de factibilidad para la actualización y formulación del esquema hidráulico considerando optimizan del recurso hídrico del PERC*, de los resultados se observa, que los caudales obtenidos no difieren tanto de las obtenidas en el informe de referencia.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El caudal para la cuenca del río cachi es determinada a partir de la precipitación disponible de los registros en las estaciones climatológicas y los registros del proyecto TRMM; previa a la utilización de las precipitaciones TRMM se validó estos registros (precipitación diaria máxima anual) y se generó las precipitaciones requeridas en las sub cuencas sin registros disponibles.
- La información obtenida de la precipitación TRMM, a nivel acumulado diario, en formato raster y su tratamiento mediante sistemas de información geográfica es muy útil para observar la distribución espacial de la precipitación, pero para el tratamiento estadístico de los datos es más adecuado su estructuración en un formato de serie de tiempo.
- La escala o dimensión de los registros TRMM a nivel temporal utilizada es el producto 3B42, correspondiente a la precipitación diaria; mientras la escala espacial es muy grande, los archivos raster están disponibles con celdas de $0.25^\circ * 0.25^\circ$, que abarca una extensión considerable, así, varias estaciones a nivel climatológica en la cuenca puede tener una sola correspondencia con una única celda de TRMM.
- Los usos del suelo de la cuenca son determinantes en las abstracciones estimadas. Disponiendo las cuencas hidrológicas compuestos por superficies muy grandes, una alternativa determinante para clasificar el uso del suelo es la utilización de los sistemas de información geográfica, para obtener una cierta aproximación a las superficies clasificadas de usos de suelo.

- Los hidrogramas obtenidos son para las precipitaciones de diseño considerados, queda añadir el caudal base para representar el hidrograma total de la cuenca del río cachi.

5.2. Recomendaciones

Para el uso correcto de las precipitaciones registradas por el proyecto TRMM, es necesario validar las precipitaciones con registros obtenidos en estaciones climáticas disponibles en la cuenca. Se recomienda utilizar un modelo meta heurístico para la validación, dado que los modelos determinísticos no logran reproducir adecuadamente la validación (comprobación) requerida.

Acrónimos

ANA	Autoridad Nacional de Agua. 1
GPM	Global Precipitation Measurement. 1
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency. 3
NASA	National Aeronautics and Space Administration. 3
OMM	Ornanización Meteorológica Mundial. 5
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. 1
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission. 3, 6

Referencias bibliográficas

- [1] Mansour Almazroui. "Calibration of {TRMM} rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009". En: *Atmospheric Research* 99.3–4 (2011), págs. 400-414. ISSN: 0169-8095. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.006>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809510003091>.
- [2] D. F. Campos Aranda. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Ed. por Editorial universitaria Potosina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí - Facultad de Ingeniería, 1998.
- [3] Daniel J. Cecil, Dennis E. Buechler y Richard J. Blakeslee. "Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description". En: *Atmospheric Research* 135–136 (2014), págs. 404-414. ISSN: 0169-8095. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.028>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809512002323>.
- [4] Cheng Chen y col. "Adaptability Evaluation of {TRMM} Satellite Rainfall and Its Application in the Dongjiang River Basin". En: *Procedia Environmental Sciences* 10, Part A (2011). 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology {ESIAT} 2011, págs. 396-402. ISSN: 1878-0296. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.065>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187802961100260X>.
- [5] Ven Chow, David Maidment y Larry Mays. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1988. ISBN: 0070108102.
- [6] Bruno Collischonn, Walter Collischonn y Carlos Eduardo Morelli Tucci. "Daily hydrological modeling in the Amazon basin using {TRMM} rainfall estimates". En: *Journal of Hydrology* 360.1–4 (2008), págs. 207-216. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.032>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169408003806>.
- [7] Zheng Duan y W.G.M. Bastiaanssen. "First results from Version 7 {TRMM} 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling–calibration procedure". En: *Remote Sensing of Environment* 131 (2013), págs. 1-13. ISSN:

- 0034-4257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.002>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712004580>.
- [8] Uriel Ezequiel. *Regresión Lineal Múltiple: estimación y propiedades*. Ed. por Universidad de Valencia. 2013, pág. 38.
- [9] Jian Fang y col. "Spatial downscaling of {TRMM} precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area". En: *Advances in Water Resources* 61 (2013), págs. 42-50. ISSN: 0309-1708. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.08.011>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170813001504>.
- [10] M. Gebremichael y M. Jossain. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer, 2009. ISBN: 9048129141.
- [11] Huang-he Gu y col. "Hydrological assessment of {TRMM} rainfall data over Yangtze River Basin". En: *Water Science and Engineering* 3.4 (2010), págs. 418-430. ISSN: 1674-2370. DOI: <http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.04.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015301319>.
- [12] Roberto Hernández. *Metodología De La Investigación (5ta Edición)*. Mc Graw-Hill Interamericana, 2010. ISBN: 6071502918. URL: <http://www.amazon.com/Metodologia-De-La-Investigacion-Edici%C3%83%C2%B3n/dp/6071502918?SubscriptionId=0JYN1NVW651KCA56C102&tag=techkie-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=6071502918>.
- [13] W.W. Immerzeel, M.M. Rutten y P. Droogers. "Spatial downscaling of {TRMM} precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula". En: *Remote Sensing of Environment* 113.2 (2009), págs. 362-370. ISSN: 0034-4257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.004>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425708003155>.
- [14] Md. Nazrul Islam e Hiroshi Uyeda. "Use of {TRMM} in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh". En: *Remote Sensing of Environment* 108.3 (2007), págs. 264-276. ISSN: 0034-4257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.011>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706004706>.
- [15] Shaofeng Jia y col. "A statistical spatial downscaling algorithm of {TRMM} precipitation based on {NDVI} and {DEM} in the Qaidam Basin of China". En: *Remote Sensing of Environment* 115.12 (2011), págs. 3069-3079. ISSN: 0034-4257. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711002331>.
- [16] Toneo Kawanishi y col. "{TRMM} Precipitation Radar". En: *Advances in Space Research* 25.5 (2000). Remote Sensing and Applications: Earth, Atmosphere and Oceans, págs. 969-972. ISSN: 0273-1177. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/>

- S0273-1177(99)00932-1. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117799009321>.
- [17] Waldo Sven Lavado Casimiro, David Labot y Gean Lopup Guyot. "Validación de la Lluvia Utilizando TRMM en dos Cuencas Amazónicas Peruanas y Su Aplicación en Modelos Mensuales de Balance Hídrico". En: *Revista Peruana Geo Atmosférica RPGA* 1.1 (2009), págs. 11-19.
- [18] Pedro Raúl Lavado y Thomas Condom. "Análisis Espacio Temporal de la Precipitación en las Zonas de Montaña de Perú (1998-2007)". En: *Revista Peruana Geo Atmosférica RPGA* 2.2 (2010), págs. 16-29.
- [19] Xiang-Hu Li, Qi Zhang y Chong-Yu Xu. "Suitability of the {TRMM} satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin". En: *Journal of Hydrology* 426-427 (2012), págs. 28-38. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.013>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941200056X>.
- [20] Zhong Liu. "Comparison of precipitation estimates between Version 7 3-hourly {TRMM} Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) near-real-time and research products". En: *Atmospheric Research* 153 (2015), págs. 119-133. ISSN: 0169-8095. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.07.032>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809514003081>.
- [21] Zhong Liu. "Comparison of versions 6 and 7 3-hourly {TRMM} multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products". En: *Atmospheric Research* 163 (2015). 6th Workshop of the International Precipitation Working Group, págs. 91-101. ISSN: 0169-8095. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.015>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809515000046>.
- [22] Zhong Liu y col. "Developing GIOVANNI-based online prototypes to intercompare TRMM-related global gridded-precipitation products". En: *Computers & Geosciences* 66 (2014), págs. 168-181. ISSN: 0098-3004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.12.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009830041300318X>.
- [23] PN. Magliano, JL. Mercau y EG. Jobbágy. "¿Es el Radar TRMM(NASA, JAXA) un Buen Estimador de las Precipitaciones de la Región Central Argentina?" En: *Grupo de Estudios Ambientales IMASL CONICET* (2008).
- [24] V.M. Mantas y col. "Validation of {TRMM} multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes". En: *Atmospheric Research* 163 (2015). 6th Workshop of the International Precipitation Working Group, págs. 132-145. ISSN: 0169-8095. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.>

- 11.012. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016980951400413X>.
- [25] Jin Meng y col. "Suitability of {TRMM} satellite rainfall in driving a distributed hydrological model in the source region of Yellow River". En: *Journal of Hydrology* 509 (2014), págs. 320-332. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.049>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413008731>.
- [26] Carlos Muñoz. *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis (Spanish Edition)*. Pearson (México), 2012. ISBN: 6073204566. URL: <http://www.amazon.com/elaborar-asesorar-investigaci%C3%83%C2%B3n-Spanish-Edition/dp/6073204566?SubscriptionId=0JYN1NVW651KCA56C102&tag=techkie-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=6073204566>.
- [27] Antonio Nieves y Federico Domínguez C. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería, un Enfoque moderno*. Ed. por Mc Graw-Hill Interamericana. 2010.
- [28] Raymundo Octavio Fashé, Joel Rojas Acuña y José Carlos Eche Llenque. "Estimación de la Tasa de Lluvia Sobre Perú Durante el Verano de 2002 usando Imágenes de los Satélites GOES-8 y TRMM". En: *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 1.1* (2005), págs. 2495-2502.
- [29] Sandra Pombo y Rodrigo Proença de Oliveira. "Evaluation of extreme precipitation estimates from {TRMM} in Angola". En: *Journal of Hydrology* 523 (2015), págs. 663-679. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.014>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001250>.
- [30] Sumit Puri, Haroon Stephen y Sajjad Ahmad. "Relating {TRMM} precipitation radar land surface backscatter response to soil moisture in the Southern United States". En: *Journal of Hydrology* 402.1-2 (2011), págs. 115-125. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411001727>.
- [31] Lia Ramos fernández. "Estudio de la Utilidad de la Lluvia Estimada de Satélite en la Modelación Hidrológica Distribuida". Tesis doct. Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [32] Consorcio Adez Ingenieros Contratistas S.R.L. - Agua Agro Asesores Asociados S.A.C. *Estudio a nivel de factibilidad para la actualización y reformulación del esquema idráulico considerando ptimización del recurso hídrico del perc.* Inf. téc. Proyecto Especial río Cachi, 2006.
- [33] R. Shrivastava y col. "Validation of the {TRMM} Multi Satellite Rainfall Product 3B42 and estimation of scavenging coefficients for 131I and 137Cs using {TRMM} 3B42 rainfall data". En: *Journal of Environmental Radioactivity* 138 (2014), págs. 132-136. ISSN: 0265-931X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/>

- j.jenvrad.2014.08.011. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X14002446>.
- [34] Rafael Dal-Ré Tenreiro y col. *Pequeños Embalses de uso Agrícola (Spanish Edition)*. Mundi-Prensa, 2003.
- [35] John S. Theon. "The tropical rainfall measuring mission (TRMM)". En: *Advances in Space Research* 14.3 (1994), págs. 159-165. ISSN: 0273-1177. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90210-0](http://dx.doi.org/10.1016/0273-1177(94)90210-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273117794902100>.
- [36] Xianwu Xue y col. "Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins?" En: *Journal of Hydrology* 499 (2013), págs. 91-99. ISSN: 0022-1694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.042>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413004952>.
- [37] Aradhana Yaduvanshi, Prashant K. Srivastava y A.C. Pandey. "Integrating {TRMM} and {MODIS} satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India". En: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* (2015), ISSN: 1474-7065. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.01.006>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706515000078>.

Anexo A

Regresión lineal múltiple

A.1. Conceptos básicos

Básicamente, los modelos de regresión (lineal, lineal múltiple,) buscan una relación entre determinadas variables consideradas independientes con otra que es dependiente. En estadística, el análisis de la regresión es un proceso estadístico para la estimación de relaciones entre variables. Incluye muchas técnicas para el modelado y análisis de diversas variables, cuando la atención se centra en la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. Más específicamente, el análisis de regresión ayuda a entender cómo el valor típico de la variable dependiente cambia cuando cualquiera de las variables independientes es variada, mientras que se mantienen las otras variables independientes fijas.

A.2. Obtención del modelo general

El procedimiento y las relaciones matemáticas transcritas en la presente sección se toman desde [8].

Si designamos por y a la variable dependiente (conocido como regresando), y por $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ a los regresores (o variables independientes), por u al error o perturbación aleatoria, el modelo de regresión lineal múltiple vendrá dado por la siguiente expresión:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + u \quad (\text{A.1})$$

Los parámetros β son términos fijos y desconocidos, estos valores se obtienen a partir de los registros conocidos: variables independientes y dependiente identificadas de acuerdo a las particularidades del fenómeno físico analizado.

Disponiendo una muestra aleatoria de tamaño n ($y_1, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, x_{5i}, \dots, x_{ki}$), con $i = 1, 2, 3, \dots, n$ que representa la muestra de una población estudiada. Ahora, expresando individualmente el registros de los datos disponibles, según la Ecuación A.1

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_1 + \beta_2 x_{21} + \beta_3 x_{31} + \dots + \beta_k x_{k1} + u_1 \\ y_2 &= \beta_1 + \beta_2 x_{22} + \beta_3 x_{32} + \dots + \beta_k x_{k2} + u_2 \\ \dots & \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ y_n &= \beta_1 + \beta_2 x_{2n} + \beta_3 x_{3n} + \dots + \beta_k x_{kn} + u_n \end{aligned}$$

Figura A.1: Expresión individual para cada muestra

El anterior sistema de ecuaciones puede expresarse de una forma más compacta usando la notación matricial. Así, se denomina:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{21} & x_{31} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{22} & x_{32} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{2n} & x_{3n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Figura A.2: Identificación matricial de variables conocidas y desconocidas

Desde la Figura A.2, se identifica las variables conocidas y desconocidas, variables dependientes y variables independientes para la regresión lineal; la matriz X es la matriz de regresores (compuesto por las variables independientes).

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{21} & x_{31} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{22} & x_{32} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{2n} & x_{3n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Figura A.3: Modelo de regresión múltiple expresado en forma matricial

El modelo de regresión múltiple expresado en forma matricial se muestra en la figura A.3. Teniendo en cuenta las denominaciones dadas a vectores y matrices, el modelo de regresión lineal múltiple puede ser expresado de forma compacta de la siguiente manera:

$$y = X\beta + u \quad (\text{A.2})$$

Donde, de acuerdo con la notación utilizada, y es un vector $n \times 1$, X es una matriz $n \times k$, β es un vector $k \times 1$ y u es un vector $n \times 1$.

A.2.1. Función de regresión muestral

La regresión consiste en obtener o estimar los parámetros poblacionales β_j a partir de una muestra dada. La función de regresión muestral (FRM) es la contrapartida de la función de regresión poblacional (FRP), ya que FRM se obtiene de una muestra dada, una nueva muestra generará diferentes estimaciones. La FRM, que es una estimación de la FRP, que viene dada por:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \hat{\beta}_3 x_{3i} + \dots + \hat{\beta}_k x_{ki} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Figura A.4: Estimación de la FRP

Que permite calcular el valor ajustado \hat{y}_i correspondiente a cada y_i . En la FRM, $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \dots, \hat{\beta}_k$ son los estimadores de los parámetros $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$. Se denomina residuo a la diferencia entre $y_i - \hat{y}_i$. Esto es:

$$\hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \hat{\beta}_3 x_{3i} - \dots - \hat{\beta}_k x_{ki}$$

Figura A.5: Residuo

Expresando de una forma más compacta utilizando notación matricial.

$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \dots \\ \hat{y}_n \end{bmatrix} \quad \hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \dots \\ \hat{u}_n \end{bmatrix}$$

Figura A.6: identificación de vectores

El modelo ajustado correspondiente, para todas las observaciones de la muestra, será el siguiente:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (\text{A.3})$$

Luego, se estiman los parámetros mediante el procedimiento de mínimos cuadrados, interpretación de los coeficientes, y otras características.

A.2.2. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación se basa en la siguiente descomposición:

$$SCT = SCE + SCR \quad (\text{A.4})$$

Donde: SCT es la suma de cuadrados totales, SCE es la suma de cuadrados explicados y SCR es la suma de cuadrados residual. Basándose en esta ecuación, el coeficiente de determinación se define como:

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} \quad (\text{A.5})$$

Otra forma de expresarlo y que es equivalente, el coeficiente de determinación se puede definir como:

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (\text{A.6})$$

Los valores extremos del coeficiente de determinación son: 0, cuando la varianza explicada es cero, y 1, cuando la varianza residual es cero, es decir, cuando el ajuste es

perfecto. Por lo tanto:

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (\text{A.7})$$

Un R^2 pequeño implica que la varianza de la perturbación (σ^2) es grande en relación a la variación de y , lo que significa que β_j no puede ser estimada con precisión. Pero hay que recordar, que una varianza de la perturbación grande puede compensarse con un tamaño muestral elevado, de forma que si n es suficientemente grande, podemos ser capaces de estimar los coeficientes con precisión a pesar de que no se hayan controlado muchos de los factores no observados.

Anexo B

Registros 3B42 daily TRMM

El registro de las precipitaciones TRMM, específicamente el producto 3B42 v7 derivado (registro de precipitaciones diarias) se obtiene desde distintas bases de datos, para la tesis se utilizó el registro de las precipitaciones en formato NetCDF y de series de tiempo.

- Los archivos NetCDF son necesarias para observar la variación espacial en la superficie de interés, cuenca río Cachi.
- Los archivos o datos en formato representado para series de tiempo es con la finalidad de observar la variación temporal.



Figura B.1: Página principal PMM(Precipitation Measurement Mission)

Para acceder a la base de datos, con la finalidad de descargar para ambas alternativas, se procede: Acceder a la página principal del proyecto PMM, desde la siguiente dirección <http://pmm.nasa.gov/>, desde esta página seleccionar el proyecto: TRMM (registro e precipitaciones hasta los trópicos) o GPM (registro de precipitaciones global), en este caso se selecciona el proyecto TRMM, la dirección es la siguiente <http://pmm.nasa.gov/TRMM>.



Figura B.2: Página principal TRMM

Luego desde esta página seleccionar *Descargar Datos TRMM*, seguidamente muestra la ventana de la Figura B.3, desde donde es posible seleccionar el nivel del producto y el producto específico a obtener. Los registros concernientes al producto de las precipitaciones diarias, se encuentra en el nivel tres y el código del producto es *3B42 v7 derived*; la selección del nivel y el tipo del producto muestra la Figura B.4, correspondiente a la dirección <http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>; donde explica las cualidades del producto seleccionado y de la misma forma, la delimitación espacial y temporal de los registros disponibles.

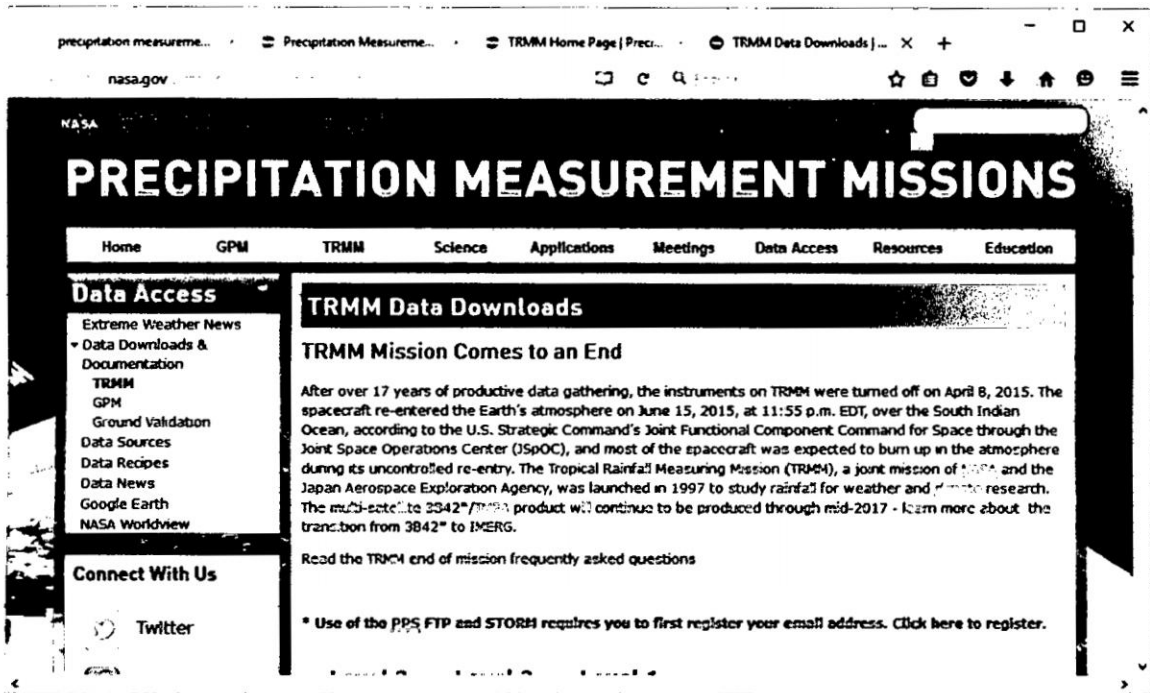


Figura B.3: Descargar datos desde TRMM

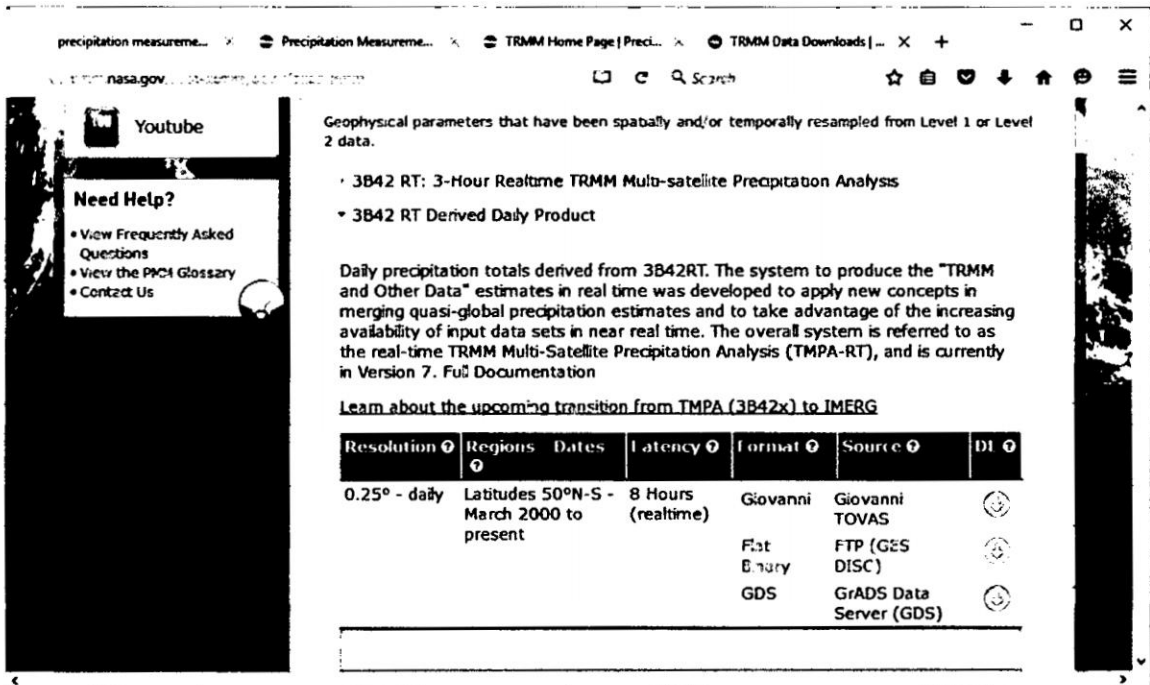


Figura B.4: Producto 3B42

Anexo C

Registro de precipitaciones

El presente capítulo contiene el registro de las precipitaciones diarias máxima anual de la estación Choccoro. Los datos son registros realizados por el desaparecido *Proyecto Especial Río Cachi*, Sub Gerencia de Operaciones y Mantenimiento (Oficina de Operaciones y Mantenimiento) - OPEMAN, actualmente gestionado por el Gobierno Regional de Ayacucho.



GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA
RED HIDROMETEOROLOGICA

REGISTRO DE PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMA ANUAL (mm)

ESTACION : CHOCÓORO
CODIGO : 016
AÑO : 2009

DISTRITO : PARAS
PROVINCIA : CANGALLO
DEPARTAMENTO : AYACUCHO

ALTITUD : 13°25'11,46"S
LATITUD : 74°28'51,18"O
LONGITUD : 4061msnm

ANO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1999	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	35.1
2000	25.5	0	47.45	10.4	14.5	8.5	9.1	10.4	3.9	24.7	3.25	22.1
2001	32.5	37.96	44.2	21.45	31.2	3.9	11.05	7.8	14.3	23.4	20.8	10
2002	39.9	79	27.5	25.6	5.8	0	9.7	6.7	8	8.1	14.3	26.8
2003	24.7	25.3	14.2	13	9.625	7.4	10	17.5	10.375	22	9.125	15.2
2004	8	29.5	35.5	14.5	4	10.5	10	6.5	12	9.5	12	19.5
2005	15.5	26	24.5	8	17	0	S/D	S/D	32	14.5	11.2	22.3
2006	31.7	29.1	20	11.1	6.5	4.6	0	9.3	8.1	20.2	19	16.4
2007	22.4	18	S/D	S/D	4.5	0	2.6	6.6	35.8	13.5	10.2	30.2
2008	22.9	36.2	24.3	0	0	0	0.46	0	17.8	9.7	18.6	22.5
2009	29.7	21.7	18	14.4	11.9	4.8	26.3	4.1	14.4	6.6	12.8	8.4
2010	23.9	20.9	30.4	16	10	1.4	1.2	0	8.8	6.7	9.5	S/D

83

P24max
35.1
47.45
44.2
79
25.3
35.5
32
31.7
35.8
36.2
29.7
30.4

Anexo D

Obtención de caudales

Queda incluido el desarrollo detallado del proceso para la obtención del caudal de máxima avenida para la sub cuenca Chicllarazo, el procedimiento incluye la hidrología estadística, obtención de la precipitación de diseño, cálculo de la precipitación efectiva y la determinación de los hidrogramas.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Tesis:

Estimación de la Disponibilidad Hídrica Usando Imágenes Digitales del Satélite TRMM

Sub Cuenca: Chicllaraso

Análisis Estadístico de Datos Hidrológicos

Distribución Gumbel

1.0 Argumentos

Registro de precipitaciones diarias máximos anuales(en mm)

x := (35.1 47.45 44.2 79 25.3 35.5 32 31.7 35.8 36.2 29.7 30.4)

x =		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	35.1	47.45	44.2	79	25.3	35.5	32	31.7	...

2.0 Distribución Gumbel

2.1 Estimación de parámetros (método de los momentos)

Número de elementos: n := cols(x) n = 12

- Promedio aritmético

$$X := \frac{\sum_{i=1}^n x_{1,i}}{n}$$

$$X = 38.529$$

- Desviación Estándar

$$S_x := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - X)^2}{n - 1}}$$

$$S = 14.116$$

Finalmente, los parámetros están dados por:

$$\alpha := \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot S$$

$$\mu := X - 0.57721566490153286061 \cdot \alpha$$

$$\alpha = 11.006$$

$$\mu = 32.176$$

2.2 Función densidad

$$f(x) := \frac{1}{\alpha} \cdot e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}} \cdot e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}$$

2.2 Función densidad acumulada

$$F(x) := e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\alpha}}}$$

3.0 Prueba de Smirnov - Kolmogorov

m Xord p(x) F(x) Diff

P := $\left\{ \begin{array}{l} x_{\text{ord}} \leftarrow \text{sort}[(x^T)^{\langle 1 \rangle}] \\ \text{for } i \in 1, 2, \dots, n \\ \quad P_{i,1} \leftarrow i \\ \quad P_{i,2} \leftarrow x_{\text{ord},i} \\ \quad P_{i,3} \leftarrow \frac{i}{n+1} \\ \quad P_{i,4} \leftarrow F(x_{\text{ord},i}) \\ \quad P_{i,5} \leftarrow |P_{i,4} - P_{i,3}| \end{array} \right.$

P =

1	25.3	0.077	0.154
2	29.7	0.154	0.286
3	30.4	0.231	0.309
4	31.7	0.308	0.352
5	32	0.385	0.362
6	35.1	0.462	0.465
7	35.5	0.538	0.477
8	35.8	0.615	0.487
9	36.2	0.692	0.5
10	44.2	0.769	0.715
11	47.45	0.846	0.779
12	79	0.923	0.986

Valor crítico del estadístico Smirnov - Kolmogorov (con un nivel de significación de 5%): $\Delta_0 := 0.22$

$$\Delta := \max(P^{\langle 5 \rangle}) \quad \Delta = 0.193$$

$$R_{ww} := \begin{cases} \Delta \leftarrow \max(P^{(5)}) \\ \text{"Distribución elegida adecuada"} & \text{if } \Delta_o > \Delta \\ \text{"Los datos no se ajustan a la distribución elegida"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

R = "Distribución elegida adecuada"

- Datos ordenados

$$yord := P^{(2)}$$

$$yord^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 1 & 25.3 & 29.7 & 30.4 & 31.7 & 32 & 35.1 & 35.5 & 35.8 & \dots \\ \hline \end{array}$$

- Función de probabilidad acumulada (Weibull)

$$WeibuLL := P^{(3)}$$

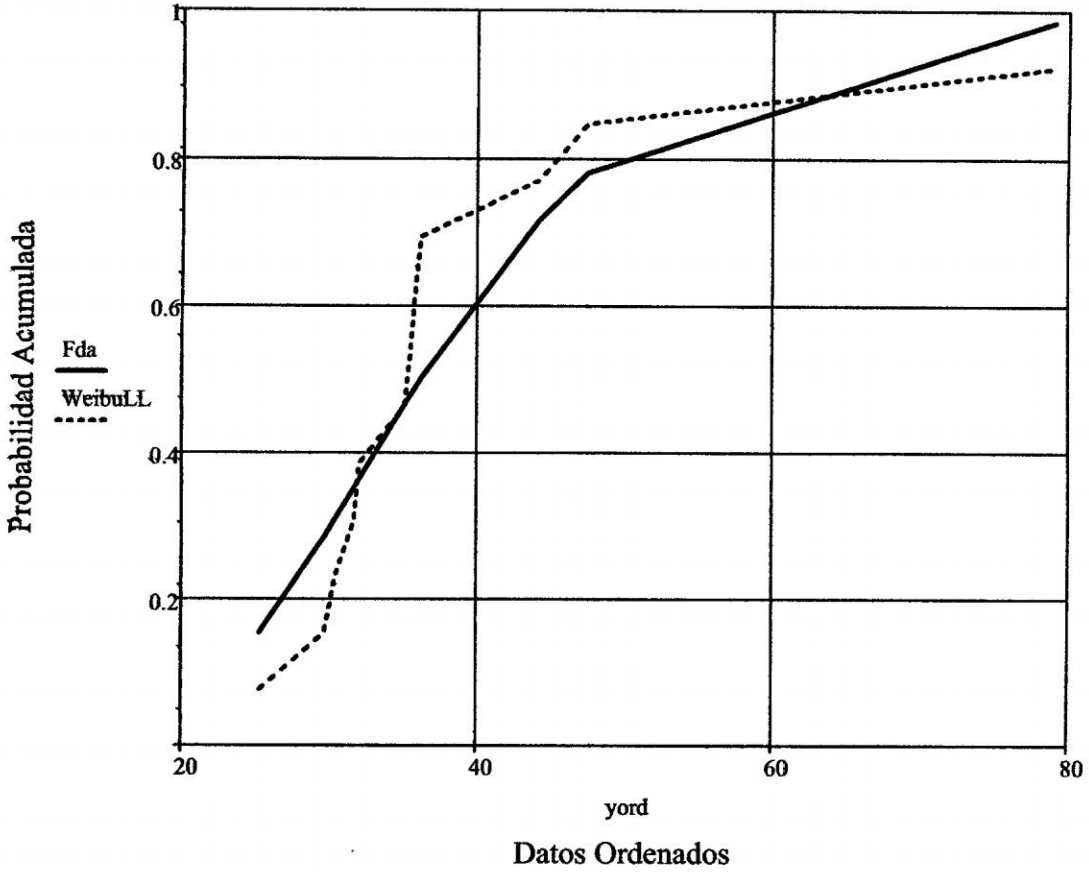
$$WeibuLL^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 1 & 0.077 & 0.154 & 0.231 & 0.308 & 0.385 & 0.462 & 0.538 & 0.615 & \dots \\ \hline \end{array}$$

- Función de densidad acumulada

$$Fda := P^{(4)}$$

$$Fda^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 1 & 0.154 & 0.286 & 0.309 & 0.352 & 0.362 & 0.465 & 0.477 & 0.487 & \dots \\ \hline \end{array}$$

Gráfico Función de Distribución Acumulada



4.0 Determinación de caudales (Q)

Determinar la precipitación de diseño para distintos periodos de retorno

$$X_{ord} := P^{(2)} \quad F_m := P^{(4)}$$

Xord =

	1
1	25.3
2	29.7
3	30.4
4	31.7
5	32
6	35.1
7	35.5
8	35.8
9	36.2
10	44.2

F =

	1
1	0.154
2	0.286
3	0.309
4	0.352
5	0.362
6	0.465
7	0.477
8	0.487
9	0.5
10	0.715

Tr :=

5
10
30
45
50
100

11	47.45
12	79

11	0.779
12	0.986

- La probabilidad conocida es

$$p := 1 - \frac{1}{Tr}$$

$$p^T = (0.8 \ 0.9 \ 0.967 \ 0.978 \ 0.98 \ 0.99)$$

- Interpolando la precipitación, para una probabilidad de p

$$Q := (\text{linterp}(F, Xord, p))$$

Entonces, las precipitaciones son:

$$Q = \begin{pmatrix} 50.64 \\ 65.896 \\ 76.066 \\ 77.761 \\ 78.1 \\ 79.626 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad Tr = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 30 \\ 45 \\ 50 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Tesis:

Estimación de la Disponibilidad Hídrica Usando Imágenes Digitales del Satélite TRMM

Sub Cuenca: Chicllaraso

Tema: Estimación de la Precipitación de Diseño

El método basado en las tormentas de diseño tipo NRCS - del "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (NRCS - Antiguo servicio de Conservación de Suelos SCS), proponen cuatro curvas adimensionales de lluvia acumulada para un periodo de 24 horas. Las gráficas propuestas son la siguientes:

- Tormenta tipo II: que corresponde a tormentas de corta duración y mayor intensidad.
- Tormenta tipo I y IA: son característicos de climas con inviernos húmedos y veranos secos, siendo tormentas de tipo IA las de menor intensidad.
- Tormenta tipo III: corresponde a tormentas tropicales con grandes profundidades de lluvia en 24 horas

1.- Datos

1.2 Precipitación de diseño - Para un tiempo de retorno considerado

Precipitación (en mm) para un tiempo de retorno de 100 años

$P_{24pr} := 65.896 \text{ mm}$

Nota:
representa de precipitación total

1.3 Elección del tipo de Precipitación

Elección del tipo de
precipitación

TipoT := 2

1.4 Precipitación Acumulada - RNCS

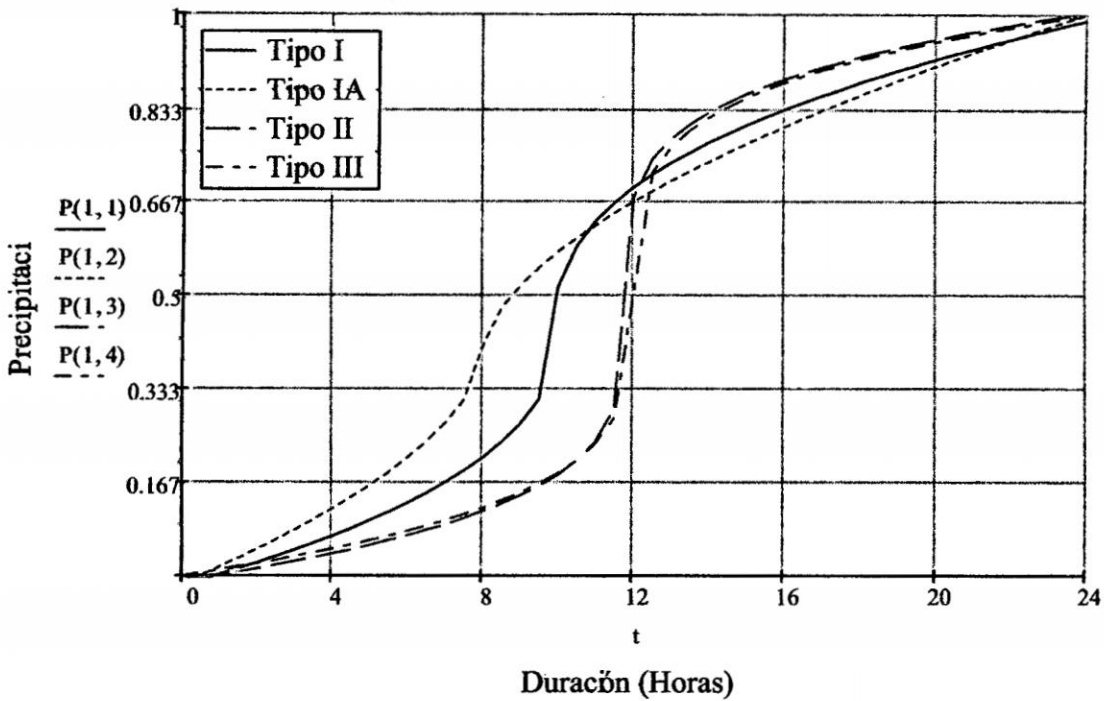
Para generar las tormentas acumuladas se realiza mediante:

```
t :=
  i ← 0
  for j ∈ 0, 0.5..24
    i ← 1 + i
    ti ← j
  t
```

	I	IA	II	III
Coefi :=	0.4511	0.3919	0.495	0.5
	9.995	7.96	11.8	12
	1	1	0.56	24
	-0.1617	0.843	10.6	24.04
	-3.0163	120.39	130	2
	0.013	0.3567	0.525	0.04
	0.5853	0.4228	0.75	0.75

```
P(P24, tipo) :=
  (
    a
    b
    c
    d ← Coefi<tipo>
    e
    f
    g
  )
  fo(x,y) ← 0
  Po ← matrix(length(t), 1, fo)
  for i ∈ 1, 2..length(t)
    Poi ← 0 if ti = 0
    Poi ← P24 · [ a + (ti - b) / c · ( (d / (e · |ti - b| + f))g ) ] otherwise
  Po
```

Tipos de Tormentas de Diseño - NRCS

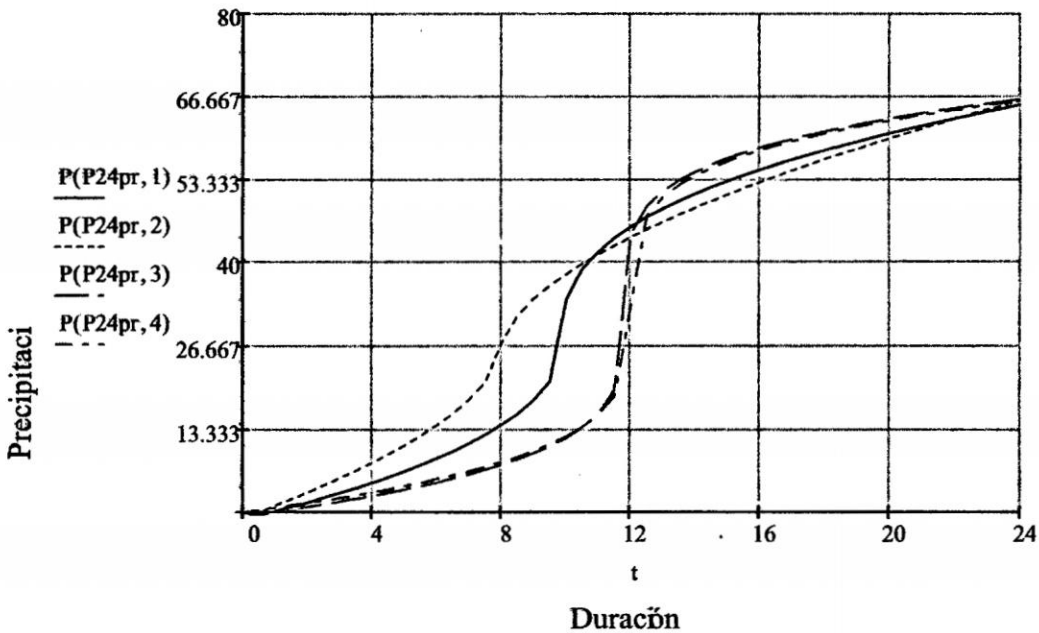


2.- Proceso de Cálculo

2.1 Precipitación de diseño

El tipo de tormenta (I, IA, II y III) se elige teniendo en cuenta la similitud gráfica de la curva masa o precipitación acumulada de la precipitación (datos) comparado con las curvas propuestas por NRCS

Tormenta Acumulada de Diseño



El tipo de tormenta seleccionado es:

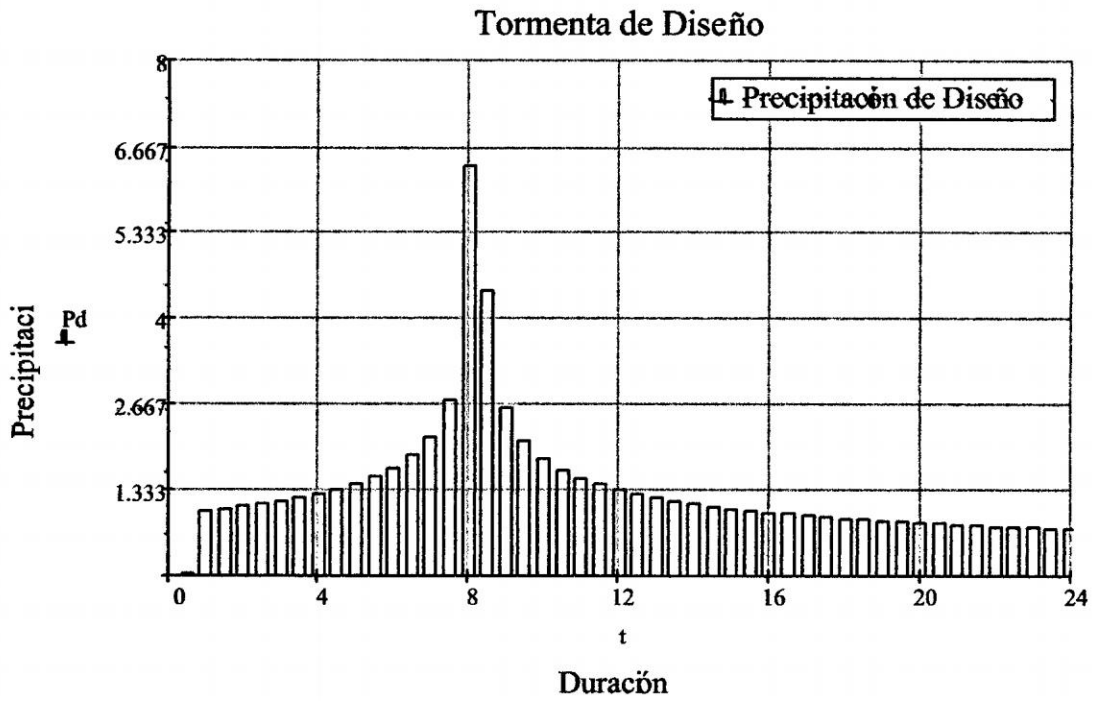
TipoT = 2

Pac := P(P24pr, TipoT)

La precipitación de diseño(Pd), el hietograma de diseño

Pd := Pac j := 2,3..length(Pd)

Pd_j := Pac_j - Pac_{j-1}



Pdt := augment(Pd, t)^T

Pdt =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.032	1.013	1.044	1.079	1.118	1.162	1.213	1.272
2	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	...

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Tesis:

Estimación de la Disponibilidad Hídrica Usando Imágenes Digitales del Satélite TRMM

Sub Cuenca: Chicllaraso

Tema: Estimación de la Precipitación Efectiva

El cálculo de la escorrentía para tormenta de diseño se estimará mediante el método propuesto por el "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (RNCS - Antiguo SCS)

El procedimiento sirve para obtener:

- La precipitación efectiva de una tormenta (tormenta de diseño)
- El volumen de tormenta perdido por las abstracciones (detención superficial, infiltración, evaporación, transpiración, etc)
- Distribución temporal de las abstracciones

1.- Datos

1.1 Precipitación de diseño (hietograma)

donde:

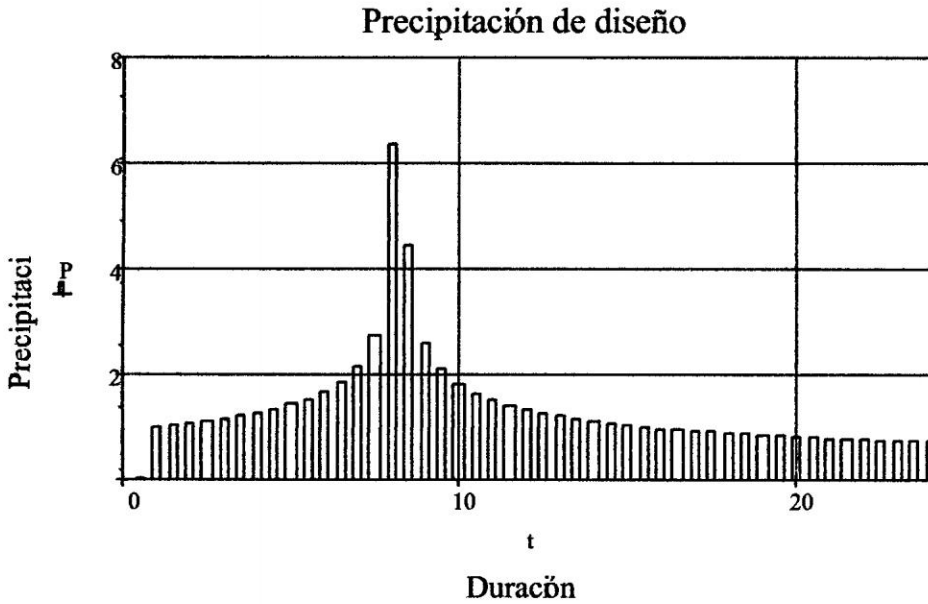
- hie: hietograma (Fila uno: Precipitación para Δt , Fila dos: tiempo)
- P: Precipitación en mm
- t: Duración (en unidad de tiempo)

$$\text{hie} := \begin{pmatrix} 0 & 0.032 & 1.013 & 1.044 & 1.079 & 1.118 & 1.162 & 1.213 & 1.272 & 1.342 & 1.427 & 1.533 & 1.672 & 1.865 & 2.164 & 2.737 & \dots \\ 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 2.5 & 3 & 3.5 & 4 & 4.5 & 5 & 5.5 & 6 & 6.5 & 7 & 7.5 & \dots \end{pmatrix}$$

Donde:

$$P := (\text{hie}^T)^{\langle 1 \rangle} \quad t := (\text{hie}^T)^{\langle 2 \rangle}$$

$P^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	1	0	0.032	1.013	1.044	1.079	1.118	1.162	1.213	...	
$t^T =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	...



1.2 Tipos y Usos del Suelo en la Cuenca

La capacidad de infiltración de un suelo y por lo tanto de generación de escorrentía depende de los siguientes factores: contenido inicial de humedad, tipo de suelo y tipo de uso del terreno. Para determinar las abstracciones mediante NRCS es necesario conocer el número de curva (CN) ponderado de la cuenca, teniendo en cuenta lo diferentes tipos y usos de suelo.

CN₀ := 80

Nota:
CN para condición de humedad antecedente tipo II e $I_a = 0.2S$

1.3 Condiciones de Humedad Antecedente

El Número de curva (CN) en la sección 1.2 es para condiciones de humedad antecedente tipo II, si las condiciones de humedad fueran distintas, del tipo I o III, es necesario transformar el CN a las condiciones requeridas.

H₀ := 2

$$\text{CN} := \begin{cases} \text{CN} \leftarrow \frac{4.2 \cdot \text{CN}_0}{10 - 0.058 \cdot \text{CN}_0} & \text{if } H_0 = 1 \\ \text{CN} \leftarrow \text{CN}_0 & \text{if } H_0 = 2 \\ \text{CN} \leftarrow \frac{23 \cdot \text{CN}_0}{10 + 0.13 \cdot \text{CN}_0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{CN} = 80$$

2.- Proceso de Análisis

2.1 Precipitación Efectiva

- La abstracción Potencial "S" se puede estimar mediante:

$$S := \frac{25400}{CN} - 254 \quad S = 63.5$$

- La precipitación total está dado por:

$$P_{total} := \sum P \quad P_{total} = 65.953$$

Nota:
Precipitación total en mm

- La abstracción inicial está dado por:

$$Ia := 0.2 \cdot S \quad Ia = 12.7$$

Es necesario comprobar la ocurrencia de la escorrentía directa, la precipitación total debe ser mayor a la abstracción inicial.

Existe precipitación neta o efectiva? - EpE

$$EpE := \begin{cases} \text{"Existe precipitación Efectiva"} & \text{if } P_{total} > Ia \\ \text{"No existe precipitación efectiva"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

EpE = "Existe precipitación Efectiva"

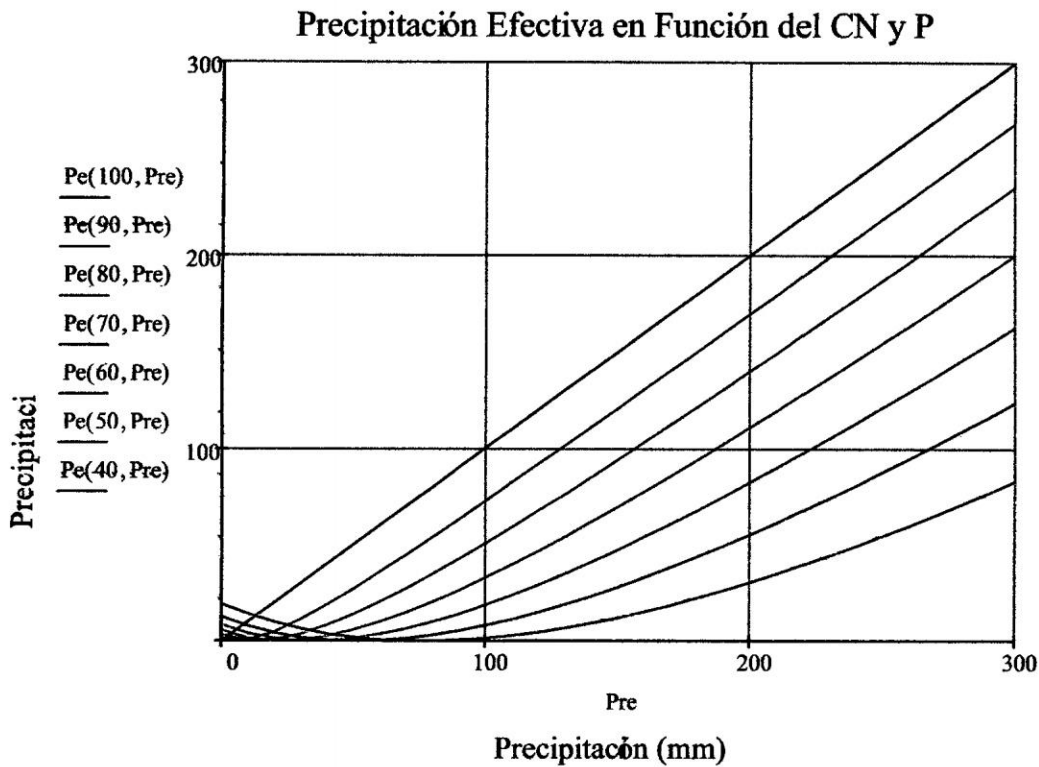
- Obtención de la precipitación efectiva

$$Pe(CN, P) := \frac{\left[P - 0.2 \cdot \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \right]^2}{P + 0.8 \cdot \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right)}$$

Nota:
cuando P_{total} es mayor a Ia

Variación de la precipitación efectiva en función de la precipitación total y el número de curva

$$Pre := \begin{cases} u \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0, 10.. 300 \\ \quad \left| \begin{array}{l} u \leftarrow u + 1 \\ pre_u \leftarrow k \end{array} \right. \\ \quad pre \end{cases}$$



- la precipitación efectiva es:

$$P_e := Pe(\text{CN}, P_{\text{total}}) \quad P_e = 24.29 \quad \text{en mm}$$

2.2 Distribución Temporal de las Abstracciones del Método NRCS

- La precipitación acumulada (Pac) en mm

$$k := 2, 3 \dots \text{length}(t)$$

$$Pac := P$$

$$Pac_k := Pac_{k-1} + P_k$$

Pac ^T =		1	2	3	4	5	6	7	8
	1	0	0.032	1.045	2.089	3.168	4.286	5.448	

- Las abstracción inicial (Iao)

```

Iao := | f(x,y) ← 0
        Iao ← matrix(length(t), 1, f)
        Poo1 ← Pac1
        for k ∈ 1, 2.. length(t)
            | Iaok ← Pack if Ia ≥ Pack
            | Iaok ← Ia otherwise
        Iao

```

$$Iao^T = \begin{array}{c|cccccccc|} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & & \\ \hline 1 & 0 & 0.032 & 1.045 & 2.089 & 3.168 & 4.286 & 5.448 & & \end{array}$$

- La abstracción continuada (Fa)

```

Fa := | f(x,y) ← 0
        Fa ← matrix(length(t), 1, f)
        for k ∈ 1, 2.. length(t)
            Fak ←  $\frac{S \cdot (Pac_k - Iao_k)}{Pac_k - Iao_k + S}$  if Pack ≥ Ia
        Fa

```

$$Fa^T = \begin{array}{c|cccccccc|} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{array}$$

- La precipitación neta acumulada (Pnetaac) para cada variación de tiempo

$Pnetaac := Pac - Iao - Fa$

$$Pnetaac^T = \begin{array}{c|cccccccc|} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{array}$$

- La precipitación neta (Pneta) para cada variación de tiempo

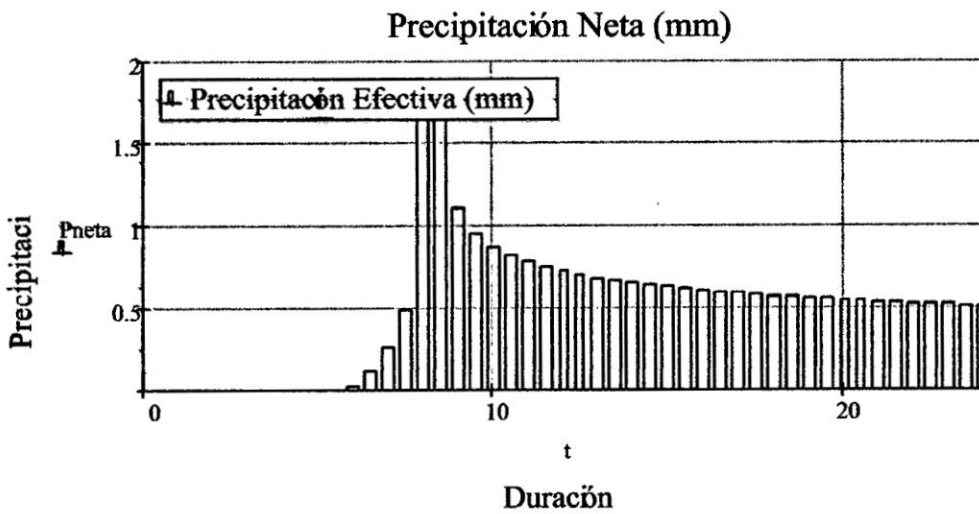
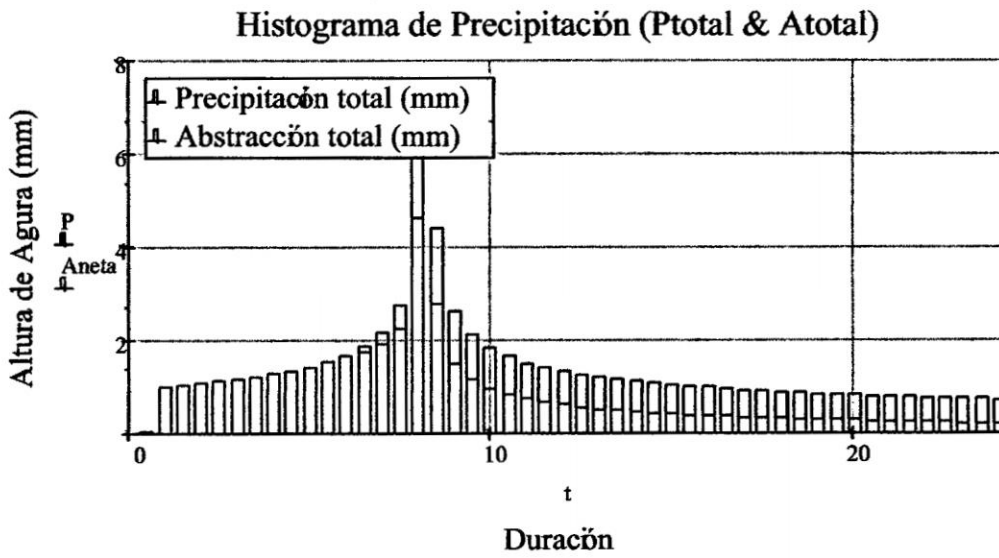
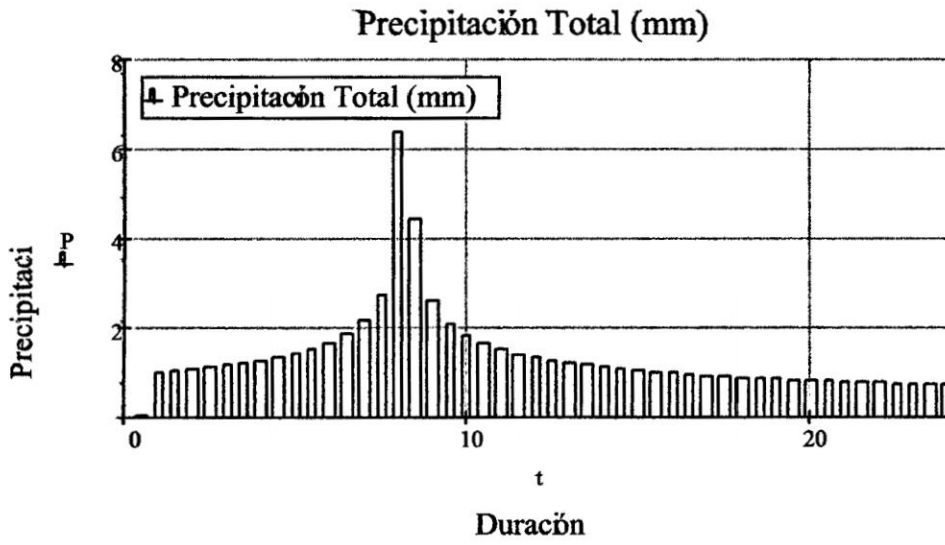
$Pneta_k := Pnetaac_k - Pnetaac_{k-1}$

$$Pneta^T = \begin{array}{c|cccccccc|} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{array}$$

- Las abstracciones neta para cada variación de tiempo

$Aneta := P - Pneta$

$$Aneta^T = \begin{array}{c|cccccccc|} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & \\ \hline 1 & 0 & 0.032 & 1.013 & 1.044 & 1.079 & 1.118 & 1.162 & 1.213 & & \end{array}$$



$P_{netat} := \text{augment}(P_{neta}, t)$

$$P_{\text{netat}}^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	...

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Tesis:

Estimación de la Disponibilidad Hídrica Usando Imágenes Digitales del Satélite TRMM

Sub Cuenca: Chicllaraso

Tema:

Hidrograma Triangular NRCS-TR55 & Hidrograma Adimensional NRCS

El "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (NRCS - Antiguo SCS) desarrolló el hidrograma triangular para aproximar el hidrograma generado por una tormenta, el método solamente obtiene el caudal máximo producido, el tiempo base del hidrograma y el tiempo para el cual se generara el caudal máximo.

El hidrograma adimensional del NRCS es resultado de observar numerosas pruebas que al dividir los caudales del hidrograma por el caudal máximo (caudal pico Q_p - resultado del hidrograma triangular del NRCS) y de igual manera, dividir el tiempo del hidrograma por el tiempo en la que ocurre el caudal máximo (t_p); los resultados así obtenidos (los hidrogramas adimensionales), para todas las cuencas son similares. El hidrograma adimensional obtenido es de utilidad para generar el hidrograma de cualquier cuenca, conociendo los parámetros generales.

El procedimiento sirve para obtener:

- El hidrograma de diseño, conociendo la precipitación efectiva (P_e), duración de la precipitación efectiva (D), el tiempo de concentración (t_c), el tiempo al caudal pico (t_p) y el caudal pico (Q_p)

1.- Datos

1.1 De la precipitación

Precipitación neta (P_e) en mm: $P_e := 24.29$

Duración de la precipitación neta (D) en horas: $D := 24 - 7 + 1$

1.2 De la cuenca

Superficie de la cuenca (km²): $A_w := 623.92$

Tiempo de concentración (t_c) en horas: $t_c := 5.062$

1.3 Parámetros relacionados con el tipo de tormenta de diseño, la precipitación efectiva, la abstracción inicial y el factor de ajuste de encharcamiento

$C0 := 1.91978$ $C1 := -0.28215$ $C2 := -0.07020$ $Fp := 0.96$

2.- Cálculos

Tiempo de la punta: $t_p := \frac{D}{2} + \frac{3}{5} \cdot t_c$ $t_p = 12.037$

Tiempo base: $t_b := 2.67 \cdot t_p$ $t_b = 32.139$

Caudal de la punta(en m³/s):

- Teniendo en cuenta la superficie del triángulo

$$Q_p := \frac{P_e \cdot A}{1.8 \cdot t_b}$$

$$Q_p = 261.967$$

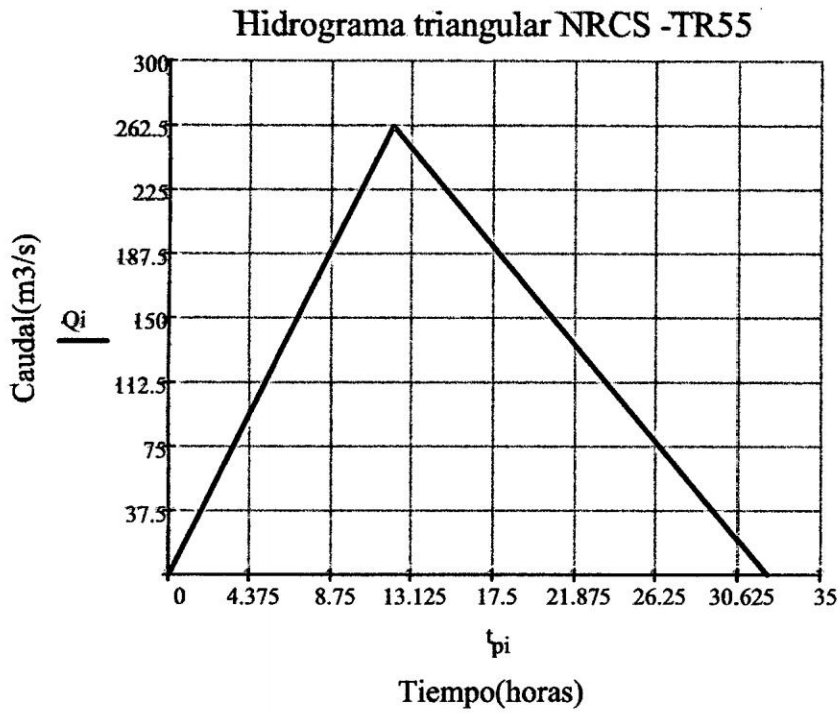
para el gráfico: $Q_i := \begin{pmatrix} 0 \\ Q_p \\ 0 \end{pmatrix}$ $t_{pi} := \begin{pmatrix} 0 \\ t_p \\ t_b \end{pmatrix}$

- Mediante el método NRCS-TR55

$$q_u := 4.3026 \cdot 10^{C0 + C1 \cdot \log(t_c) + C2 \cdot \log(t_c)^2 - 6}$$

$$Q_{po} := q_u \cdot A \cdot 100 \cdot P_e \cdot F_p$$

$$Q_{po} = 303.942$$



Haan y otros investigadores, proponen una ecuación general para los hidrogramas adimensionales de tipo:

$$k := 3.89$$

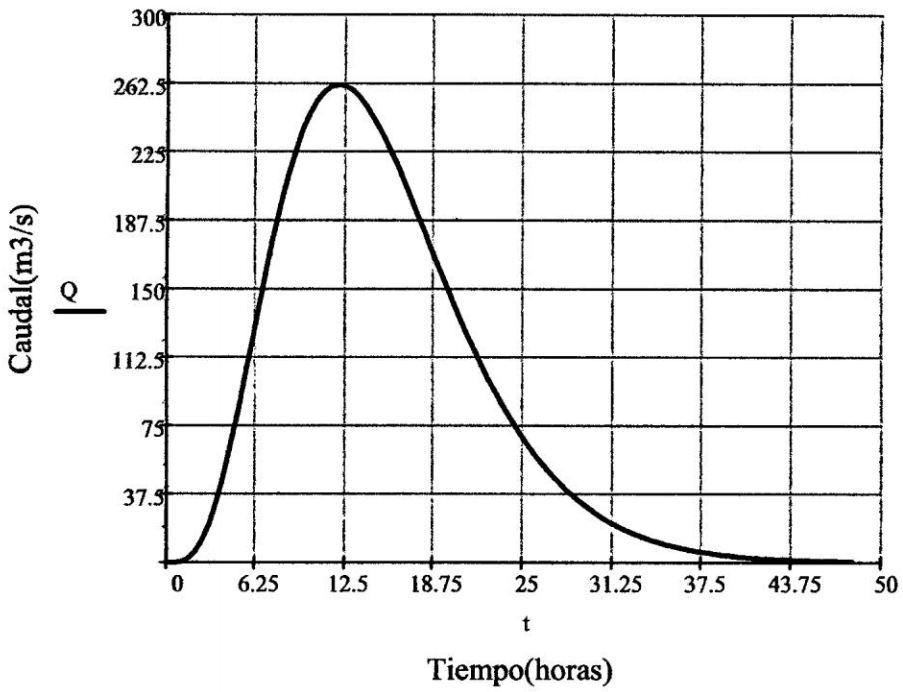
$$Q_0(t) := Q_p \left(\frac{t}{t_p} e^{1 - \frac{t}{t_p}} \right)^k$$

$$t := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ \text{for } k \in 0, 0.5 \dots (1.5 \cdot t_b) \\ \quad \begin{cases} j \leftarrow j + 1 \\ t_j \leftarrow k \end{cases} \\ t \end{cases}$$

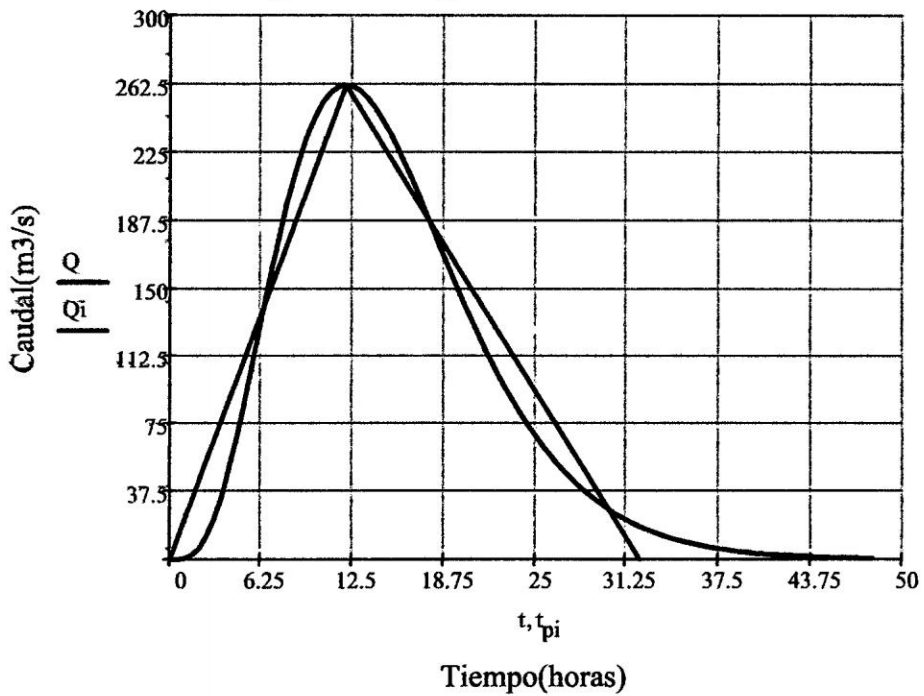
$$j := 1, 2 \dots \text{length}(t)$$

$$Q_j := Q_0(t_j)$$

Hidrograma Adimensional NRCS



Hidrograma Triangular & Adimensional - NRCS



$Q_t := \text{augment}(t, Q)$

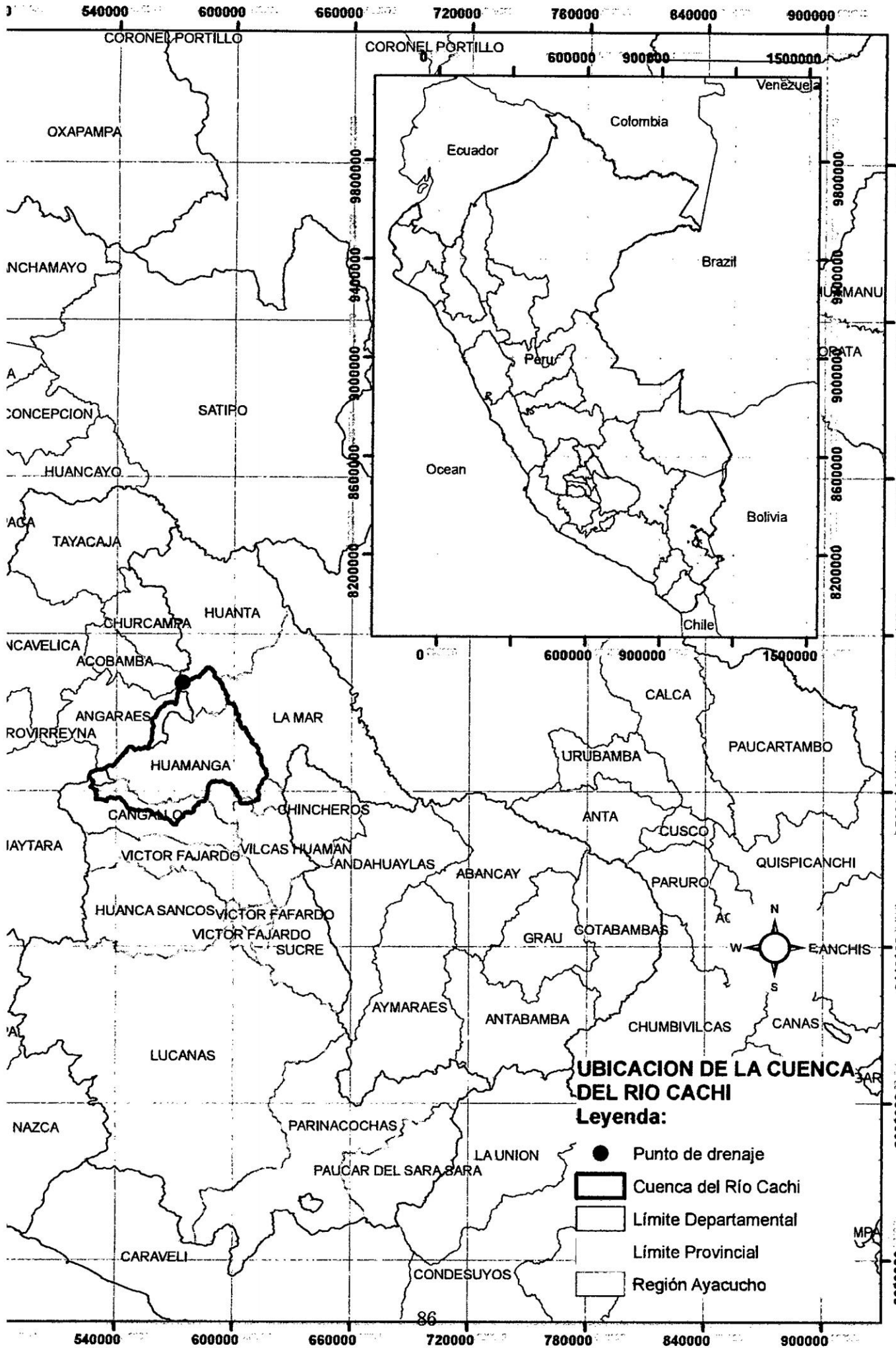
$$Q_t^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 1 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 & 2.5 & 3 \\ \hline 2 & 0 & 0.046 & 0.581 & 2.393 & 6.233 & 12.633 & \dots \\ \hline \end{array}$$

Anexo E

Planos

Los planos de la cuenca de estudio, de la cuenca del Río Cachi y Subcuencas:

1. Plano de ubicación.
2. Plano de de la de-limitación de la cuencas del Río Cachi.
3. Plano de sub cuencas
4. Plano de ubicación de las estaciones meteorológicas



UBICACION DE LA CUENCA DEL RIO CACHI

Leyenda:

- Punto de drenaje
- ▭ Cuenca del Río Cachi
- ▭ Límite Departamental
- ▭ Límite Provincial
- ▭ Región Ayacucho

