

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS PRECIPITACIÓN-
ESCORRENTÍA APLICADOS EN LA CUENCA VILCANOTA-PÍSAC**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Alicia Haydeé Medina Salazar

ASESORA:

Dra. Miluska Anthuannet Rosas Barturen

Lima, 2026

Informe de Similitud

Yo, Miluska Anthuannet Rosas Barturén,

docente de la Facultad/Sección de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú,
asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado


ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MODELOS PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA APLICADOS EN LA CUENCA
VILCANOTA-PÍSAC,

de la autora: Alicia Haydeé Medina Salazar

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 22%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 31/03/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 31 de marzo del 2026.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Rosas Barturén, Miluska Anthuannet</u>	
DNI: 45420446	Firma: 
ORCID: 0000-0002-3717-0172	

RESUMEN

La cuenca en estudio, denominada Vilcanota-Písac, ubicada en el departamento de Cusco, constituye uno de los sistemas hidrográficos más relevantes del sur del Perú tanto por su aporte a la economía regional como por su alto valor ecológico. La presente tesis se enfoca en calcular la oferta hídrica mensual en el punto de drenaje de este sistema hidrográfico mediante el modelo lluvia-escorrentía más representativo de sus condiciones hidrológicas, el cual se eligió de entre tres modelos seleccionados: GR2M, Lutz-Scholz y Témez.

Primero, se realizó el análisis de consistencia de la información disponible. La información consistió en los registros de precipitación total mensual, temperatura máxima, mínima y media mensual entre los años 1964 y 2022. Luego, se aplicaron los tres modelos hidrológicos seleccionados. Se tuvieron dos periodos de calibración, 1964-1980 y 1987-1994, y dos de validación, 1999-2005 y 2009-2022. Se utilizaron cuatro métricas, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, la más importante), el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2), mediante las cuales se evaluó la calidad del ajuste de los parámetros en la calibración y validación.

Se determinó que el modelo GR2M fue el modelo hidrológico más representativo, el cual alcanzó las siguientes métricas en las etapas de calibración y validación, respectivamente: un NSE de 0.84 y 0.65, un r de 0.82 y 0.84, un RMSE de 13.65 y 17.64 m^3/s , y un R^2 de 0.52 y 0.69. El modelo Lutz-Scholz no logró una performance satisfactoria en ninguna de las etapas. El modelo Témez no logró una performance satisfactoria que fuera consistente en ambas etapas. Finalmente, se obtuvieron los caudales medios mensuales de la cuenca, que se encontraron entre 27.1 y 130 m^3/s . Se concluyó que, con respecto a los modelos hidrológicos, el modelo GR2M representa mejor la variabilidad de los datos observados de la cuenca Vilcanota-Písac, a pesar de que no logra reproducir los caudales superiores a 270 m^3/s .

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional.

A mis abuelos, que siempre estuvieron conmigo.

A mis tíos, primos, amigos que me animaron a seguir adelante.

A mi asesora, por su paciencia, sabiduría y confianza.

Y, por último, a *Vilcanota*, tema orquestal que me inspiró para hacer este trabajo.



TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo 1	Generalidades.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Justificación	3
1.3	Objetivo.....	4
1.4	Hipótesis	4
1.5	Alcance y Limitaciones.....	5
Capítulo 2	Marco Teórico y Estado del Arte.....	6
2.1	Ciclo Hidrológico.....	6
2.2	Los Modelos Hidrológicos a Utilizar.....	7
2.2.1	Modelo GR2M.....	8
2.2.2	Modelo Lutz-Scholz.....	11
2.2.3	Modelo Témez.....	16
2.3	Antecedentes de Trabajos Similares	20
2.3.1	Publicación sobre la aplicación del método Lutz-Scholz (1980).....	20
2.3.2	Generación de caudales mensuales en la cuenca del río Vilcanota (2012).....	22
2.3.3	Modelación eco-hidrológica en la cuenca del río Vilcanota (2020).....	24
2.4	Hidrología de la Cuenca Urubamba.....	26
2.4.1	Ubicación y características geográficas.....	26
2.4.2	Precipitación.....	28
2.4.3	Hidrografía y régimen hidrológico de la cuenca Urubamba.....	31
2.4.4	Cambio climático y variabilidad hidrológica.....	34
Capítulo 3	Materiales y Metodología	37
3.1	Materiales.....	37
3.1.1	Geografía y red hidrográfica.....	37

3.1.2	Data climatológica e hidrológica.	37
3.1.3	Programas de cómputo utilizados.	37
3.2	Metodología	38
3.2.1	Análisis de consistencia de la información.	38
3.2.2	Completación y extensión de la información.	40
3.2.3	Cálculo de la evapotranspiración potencial.	41
3.2.4	Cálculo de los valores medios para la cuenca.	42
3.2.5	Definición de los periodos de calibración y de validación.	42
3.2.6	Aplicación de los modelos hidrológicos.	43
3.2.6.1	modelo GR2M.	43
3.2.6.2	modelo Lutz-Scholz.	43
3.2.6.3	modelo Témez.	44
3.2.7	Elaboración de los caudales medios mensuales.	45
Capítulo 4	Tratamiento de Información	46
4.1	Precipitación Total Mensual	46
4.1.1	Descripción de la información pluviométrica.	46
4.1.2	Análisis de consistencia.	48
4.1.2.1	análisis visual gráfico.	48
4.1.2.2	análisis de doble masa.	55
4.1.2.3	análisis estadístico.	63
4.1.2.3.1	análisis de saltos.	63
4.1.2.3.2	análisis de tendencias.	65
4.1.3	Completación y extensión de la información.	66
4.1.4	Cálculo de la precipitación total media areal.	67
4.2	Temperatura Media Mensual	67

4.2.1	Descripción de la información meteorológica.....	67
4.2.2	Análisis de consistencia.....	70
4.2.2.1	análisis visual gráfico.....	70
4.2.2.2	análisis de doble masa.....	75
4.2.2.3	análisis estadístico.....	76
4.2.2.3.1	análisis de saltos.....	76
4.2.2.3.2	análisis de tendencias.....	77
4.2.3	Completación y extensión de la información.....	78
4.2.4	Cálculo de la temperatura media areal.....	79
4.3	Evapotranspiración Potencial Media Mensual.....	79
4.4	Caudal Promedio Mensual.....	79
4.5	Periodos de Calibración y Validación.....	81
Capítulo 5	Modelación Hidrológica.....	82
5.1	Modelo GR2M.....	82
5.1.1	Etapa de calibración.....	82
5.1.2	Etapa de validación.....	83
5.1.2.1	validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980.....	83
5.1.2.2	validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994.....	85
5.1.3	Elección de los parámetros a escoger.....	86
5.2	Modelo Lutz-Scholz.....	87
5.2.1	Etapa de calibración.....	87
5.2.2	Etapa de validación.....	89
5.2.2.1	validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980.....	89
5.2.2.2	validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994.....	90
5.2.3	Elección de los parámetros a escoger.....	92

5.3	Modelo Témez	92
5.3.1	Etapa de calibración.....	92
5.3.2	Etapa de validación.....	94
5.3.2.1	validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980.....	94
5.3.2.2	validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994.....	95
5.3.3	Elección de los parámetros a escoger.	97
5.4	Determinación del Modelo Más Representativo.....	97
Capítulo 6	Generación de Caudales Medios Mensuales.....	98
6.1	Precipitación Total Mensual para el Año Promedio	98
6.2	Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio.....	98
6.3	Caudales Mensuales para el Año Promedio.....	99
Conclusiones	102
Recomendaciones	105
Bibliografía	107
Anexos	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 <i>Coefficientes para el cálculo de la PE</i>	13
Tabla 2.2 <i>Almacenamiento hídrico durante la época lluviosa (%)</i>	15
Tabla 2.3 <i>Caudales mensuales en el río Vilcanota para el año promedio</i>	21
Tabla 2.4 <i>Eficiencia de los Modelos 1, 2 y 3</i>	23
Tabla 2.5 <i>Caudales mensuales en el río Vilcanota para el año promedio</i>	24
Tabla 2.6 <i>Precipitación acumulada anual (mm/año) y estacional (mm/trimestre) en la cuenca Urubamba. Periodo: 1971-2000</i>	30
Tabla 3.1 <i>Valores de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe</i>	43
Tabla 4.1 <i>Datos generales de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas</i>	46
Tabla 4.2 <i>Estaciones hidrometeorológicas escogidas para el estudio</i>	47
Tabla 4.3 <i>Periodos de información a evaluar en el análisis estadístico</i>	63
Tabla 4.4 <i>Resultados del Análisis de saltos</i>	63
Tabla 4.5 <i>Periodos de información a corregir</i>	64
Tabla 4.6 <i>Resultados del análisis de tendencia en la media</i>	65
Tabla 4.7 <i>Resultados del análisis de tendencia en la desviación estándar</i>	66
Tabla 4.8 <i>Media y varianza de las series pluviométricas antes y después de la completación</i>	67
Tabla 4.9 <i>Estaciones meteorológicas escogidas para el estudio</i>	68
Tabla 4.10 <i>Estaciones hidrometeorológicas escogidas para el estudio</i>	68
Tabla 4.11 <i>Periodos de información a evaluar en el análisis estadístico</i>	75
Tabla 4.12 <i>Resultados del Análisis de saltos</i>	76
Tabla 4.13 <i>Periodos de información a corregir</i>	77
Tabla 4.14 <i>Resultados del análisis de tendencia en la media</i>	77
Tabla 4.15 <i>Resultados del análisis de tendencia en la desviación estándar</i>	78

Tabla 4.16 <i>Media y varianza de las series meteorológicas antes y después de la completación</i>	78
Tabla 4.17 <i>Estación hidrológica escogida para el estudio</i>	79
Tabla 5.1 <i>Parámetros del modelo GR2M en la etapa de calibración del periodo 1964-1980</i>	82
Tabla 5.2 <i>Parámetros del modelo GR2M en la etapa de calibración del periodo 1987-1994</i>	82
Tabla 5.3 <i>Resumen de las métricas obtenidas de la aplicación del modelo GR2M en el periodo 1987-1994</i>	97
Tabla 6.1 <i>Precipitación Total Mensual para el Año Promedio (mm)</i>	98
Tabla 6.2 <i>Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio (mm)</i>	98
Tabla 6.3 <i>Caudal Promedio Mensual para el Año Promedio (m³/s)</i>	99
Tabla 6.4 <i>Diferencias entre el Caudal Promedio Mensual del modelo GR2M y el antecedente (m³/s)</i>	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 <i>Esquema del modelo GR2M</i>	9
Figura 2.2 <i>Esquema del flujo del agua del modelo Témez</i>	17
Figura 2.3 <i>Ley de excedentes (izq.) y Ley de infiltración (der.)</i>	19
Figura 2.4 <i>Modelo numérico del terreno de la cuenca Vilcanota utilizado</i>	22
Figura 2.5 <i>Ciclo anual de los caudales simulados y observados</i>	23
Figura 2.6 <i>(a) Ubicación de la cuenca del río Vilcanota; (b) Elevación del terreno, subcuencas y red hídrica; y (c) Mapa del uso de tierra. Las zonas achuradas representan zonas de muestreo para las principales clases de vegetación (1: FETZ, 2: AGRL, 3: FRST y 4: PAST)</i>	25
Figura 2.7 <i>Ubicación de la cuenca Vilcanota-Písac</i>	27
Figura 2.8 <i>Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio</i>	29
Figura 2.9 <i>Ciclo anual de la precipitación en diferentes sectores de la cuenca Urubamba (mm/mes)</i>	31
Figura 2.10 <i>Red hidrográfica de la cuenca Urubamba</i>	32
Figura 3.1 <i>Esquema para la validación de la información</i>	41
Figura 3.2 <i>Diagrama de flujo para la modelación hidrológica</i>	45
Figura 4.1 <i>Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas</i>	47
Figura 4.2 <i>Gráfico de continuidad de la información</i>	48
Figura 4.3 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Acomayo</i>	49
Figura 4.4 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Anta Ancachuro</i>	49
Figura 4.5 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Ccatcca</i>	50
Figura 4.6 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Colquepata</i>	50
Figura 4.7 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Combapata</i>	51
Figura 4.8 <i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Granja Kayra</i>	51

Figura 4.9	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Paruro</i>	52
Figura 4.10	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Pisac</i>	52
Figura 4.11	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Pomacanchi</i>	53
Figura 4.12	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Santa Rosa</i>	53
Figura 4.13	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Sicuani</i>	54
Figura 4.14	<i>Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Urubamba</i>	54
Figura 4.15	<i>Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 1</i>	55
Figura 4.16	<i>Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 2</i>	56
Figura 4.17	<i>Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 3</i>	56
Figura 4.18	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Acomayo</i>	57
Figura 4.19	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Anta Ancachuro</i>	58
Figura 4.20	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Ccatcca</i>	58
Figura 4.21	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Colquepata</i>	59
Figura 4.22	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Combapata</i>	59
Figura 4.23	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Paruro</i>	60
Figura 4.24	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pisac</i>	60
Figura 4.25	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pomacanchi</i>	61
Figura 4.26	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Santa Rosa</i>	61
Figura 4.27	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Sicuani</i>	62
Figura 4.28	<i>Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Urubamba</i>	62
Figura 4.29	<i>Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas</i>	69
Figura 4.30	<i>Gráfico de continuidad de la información meteorológica</i>	69
Figura 4.31	<i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Acomayo</i>	70

Figura 4.32 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Anta Ancachuro</i>	71
Figura 4.33 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Ccatcca</i>	71
Figura 4.34 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Granja Kayra</i>	72
Figura 4.35 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Paruro</i>	72
Figura 4.36 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Pisac</i>	73
Figura 4.37 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Pomacanchi</i>	73
Figura 4.38 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Sicuani</i>	74
Figura 4.39 <i>Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Urubamba</i>	74
Figura 4.40 <i>Ubicación geográfica de la estación hidrológica</i>	80
Figura 4.41 <i>Gráfico de precipitación, evapotranspiración potencial y caudal (mm)</i>	80
Figura 4.42 <i>Caudales observados incompletos (m³/s)</i>	81
Figura 5.1 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo GR2M</i>	83
Figura 5.2 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo GR2M</i>	83
Figura 5.3 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo GR2M</i>	84
Figura 5.4 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo GR2M</i>	84
Figura 5.5 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo GR2M</i>	85
Figura 5.6 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo GR2M</i>	86
Figura 5.7 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz</i> ...	88

Figura 5.8 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz...</i>	88
Figura 5.9 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz</i>	89
Figura 5.10 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz</i>	90
Figura 5.11 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz</i>	91
Figura 5.12 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz</i>	91
Figura 5.13 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo Témez</i>	93
Figura 5.14 <i>Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo Témez</i>	93
Figura 5.15 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Témez.....</i>	94
Figura 5.16 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Témez.....</i>	95
Figura 5.17 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Témez.....</i>	96
Figura 5.18 <i>Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Témez.....</i>	96
Figura 6.1 <i>Gráfico de Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio (mm)</i>	98
Figura 6.2 <i>Hidrograma de Caudales Medios Mensuales para el Año Hidrológico Típico..</i>	100
Figura 6.3 <i>Gráfico comparativo de los Caudales Medios Mensuales calculados y aquellos provenientes del antecedente</i>	101

ANEXOS

Anexo A. Tabla de Precipitación Total Mensual media areal	111
Anexo B. Diagramas de doble masa de cada estación meteorológica (TMED).....	113
Anexo C. Diagramas de doble masa de estación base vs cada estación meteorológica (TMED)	115
Anexo D. Tabla de Temperatura Media Mensual media areal	119
Anexo E. Tablas de Evapotranspiración Potencial Mensual	121
Anexo F. Tabla de Evapotranspiración Potencial Mensual media areal	135



Capítulo 1 Generalidades

1.1 Introducción

Las fuentes de agua dulce, como los lagos, ríos y humedales, han sido siempre vitales para el desarrollo de las civilizaciones. Desde tiempos remotos, la ingeniería ha ofrecido herramientas y métodos para poder gestionar y cuantificar el recurso hídrico de manera responsable. En la actualidad, la ingeniería hidráulica, rama de la ingeniería civil orientada al diseño de obras relacionadas a la planificación de dicho recurso, se apoya en la hidrología, ciencia que estudia el ciclo del agua dentro de los ecosistemas.

La hidrología tiene como objetivo el estudio de los diferentes procesos que conforman el ciclo hidrológico para realizar pronósticos confiables de las principales variables hidrológicas, ya sean la precipitación, temperatura, escorrentía, entre otras. (Chow, 1994). La modelación hidrológica se ha ido convirtiendo en una valiosa herramienta para dicho fin desde su introducción en los años 60's. Esta consiste en simular y predecir el comportamiento de un sistema hidrológico, como las cuencas hidrográficas, mediante el empleo de modelos matemáticos y computacionales. Sin embargo, la calidad de los resultados está fuertemente condicionada por la disponibilidad de información representativa y confiable. Ello hace que las etapas de calibración y validación sean componentes fundamentales de la modelación.

En el caso de las cuencas andinas del Perú, existe una escasa disponibilidad y continuidad de datos hidrometeorológicos observados in situ, lo cual representa un desafío importante para los estudios hidrológicos. Las cuencas ubicadas en regiones altas de los Andes presentan una alta heterogeneidad topográfica y climatológica, con importantes variaciones en precipitación, temperatura y flujo de los ríos a lo largo del año. Esta complejidad natural, por sí sola, dificulta la modelación hidrológica; sin embargo, se complica aún más por la limitada cobertura de estaciones hidrométricas y pluviométricas, registros fragmentados y largos periodos de datos faltantes. Por ejemplo, en la cuenca del río Vilcanota, los pronósticos de caudales enfrentan

incertidumbres adicionales debido a que la red de observación es dispersa, con registros cortos y numerosas ausencias de datos, lo que reduce la precisión de los modelos y limita su aplicación operativa para la gestión hídrica y la mitigación de eventos hidrológicos extremos como inundaciones y sequías (Llauca et al, 2023). Esta situación refleja una condición estructural de muchas cuencas altoandinas donde la dificultad de acceso, el costo de mantenimiento de estaciones y la falta de financiamiento impiden la generación de series hidrológicas robustas.

Por otro lado, la oferta hídrica mensual (usualmente expresada como caudal medio mensual) es una variable hidrológica clave para caracterizar el régimen intra-anual de una cuenca y comprender su variabilidad estacional entre periodos de avenidas y estiajes. Su conocimiento resulta fundamental para la planificación hidrológica, el diseño de infraestructura hidráulica, actividades como la agricultura y riego, la evaluación hidroenergética y la gestión ambiental. Esta oferta hídrica puede estimarse mediante mediciones directas en estaciones hidrométricas, modelos hidrológicos, técnicas de hidrología estadística o metodologías combinadas. En cuencas con información observada limitada o discontinua, la estimación confiable del caudal medio mensual resulta aún más relevante, pues permite generar series representativas que sustentan diversos estudios y aplicaciones técnicas.

La cuenca en estudio, a ser llamada Vilcanota-Písac de ahora en adelante, pertenece a la cuenca Urubamba y cuenta con 7031.12 km² de extensión (aprox. 700 000 ha). El tema propuesto para el desarrollo de la tesis consiste en calcular la oferta hídrica mensual de la cuenca Vilcanota-Písac, utilizando el modelo lluvia-escorrentía que mejor represente las condiciones hidrológicas de la cuenca, elegido de entre tres modelos lluvia-escorrentía agregados de pocas variables: GR2M, Lutz-Scholz y Témez. Para ello, se usó como insumo en común data hidroclimatológica proporcionada por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). La comparación de la eficiencia de cada modelo se realizó

por medio de métricas de bondad de ajuste. Una vez determinado el modelo y sus parámetros óptimos, se obtuvieron los caudales medios mensuales de la cuenca.

1.2 Justificación

En el caso de la cuenca Vilcanota-Písac, se han realizado algunos estudios de oferta hídrica mensual, de carácter público, por parte de diferentes entidades a lo largo del tiempo. El primer estudio hidrológico público que se hizo en la cuenca data del año 1980, mientras que el último data del año 2012. Sin embargo, los resultados no han sido los mismos ni han sido comparables del todo. Esto se debe a que las condiciones hidrológicas de un sistema hidrográfico como la cuenca Vilcanota-Písac pueden cambiar significativamente en el tiempo por una variedad de factores naturales y antropogénicos, como la variabilidad climática, la alteración del uso del suelo y la cobertura vegetal, la intervención humana, etc. Actualmente, a más de diez años desde el último estudio realizado, es evidente que dicha información no es la más adecuada para poder tener conocimiento de la disponibilidad del recurso hídrico a escala mensual en la cuenca, donde se realiza actividad agrícola, pesquera, minera, entre otras.

Como consecuencia de dicha problemática, por un lado, se tiene una gestión inadecuada del agua a lo largo de la cuenca, donde existen una sobreexplotación de los recursos, dificultades de acceso para las comunidades locales y disminución de la calidad del agua. Por otro lado, dicha gestión inadecuada puede tener consecuencias económicas significativas, como pérdidas en la producción agrícola, incremento en los costos de abastecimiento de agua potable o daños a la infraestructura debido a inundaciones o sequías (ANA, 2015).

En la zona baja de la cuenca Vilcanota-Písac existe una cantidad aceptable de estaciones meteorológicas con series de datos suficientemente largas para la modelación; mientras que solo existe una estación hidrométrica en toda la cuenca que cumple dicha condición. La ventaja del presente trabajo consiste en la cantidad de información hidrometeorológica utilizada, a diferencia del último trabajo publicado en el año 2012. Al finalizar la investigación se habrá

generado la oferta hídrica mensual en el punto de aforo de la cuenca haciendo uso del modelo hidrológico que mejor represente las condiciones hidrológicas en dicha región. Esta información podrá dar un marco de referencia general y más actualizado sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la región, lo cual podrá servir como insumo en el diseño y planificación de infraestructura hidráulica.

1.3 Objetivo

Determinar aquel modelo hidrológico que logra representar mejor el proceso precipitación-escorrentía en la cuenca Vilcanota-Písac a escala mensual.

Asimismo, se tienen como objetivos específicos:

- Realizar el tratamiento de la data meteorológica, la cual incluye los procesos de: corrección, completación y extensión de la información.
- Obtener los parámetros óptimos de cada modelo mediante los procesos de calibración y validación.
- Conocer la eficiencia de cada modelo haciendo uso de métricas de bondad de ajuste.
- Calcular los caudales medios mensuales mediante el modelo determinado utilizando los parámetros óptimos identificados.

1.4 Hipótesis

Al menos un modelo logrará representar adecuadamente el proceso precipitación-escorrentía en la cuenca Vilcanota-Písac a escala mensual.

Asimismo, se tienen como hipótesis específicas:

- Será necesario realizar la corrección, completación y extensión de la información hidrometeorológica.
- La calibración y validación de los modelos permitirán obtener los parámetros óptimos de estos para cada región de calibración.
- La eficiencia de cada modelo se obtendrá mediante las métricas de bondad de ajuste.

- Los caudales medios mensuales guardarán correspondencia con los obtenidos en investigaciones anteriores.

1.5 Alcance y Limitaciones

El presente trabajo se orienta al cálculo de las descargas medias mensuales en la cuenca de estudio mediante el uso de un modelo hidrológico elegido entre tres modelos previamente seleccionados: GR2M, Lutz-Scholz y Témez, utilizando información hidrometeorológica disponible y técnicas de análisis y completación de datos. El trabajo se desarrolla a escala mensual y se enfoca exclusivamente en la representación del comportamiento hídrico de la cuenca, como insumo para futuros estudios hidrológicos y de gestión del recurso hídrico.

Respecto a las limitaciones de la investigación, se tiene a la ausencia parcial de información en las distintas estaciones hidrometeorológicas, la distribución no uniforme de estas dentro de la cuenca y la existencia de una única estación hidrológica con la cual poder realizar los procesos de calibración y validación. El registro temporal de la data se limita al período entre los años 1964 y 2022. Por último, el mayor número de estaciones meteorológicas se encuentra en la parte baja de la cuenca, mientras que en las partes intermedia y alta (que ocupan la mayor parte de la cuenca) solo se tienen tres estaciones.

Por otra parte, los modelos hidrológicos aplicados se escogieron debido a su requerimiento de pocas variables. Este tipo de modelos fueron desarrollados en regiones con información limitada, por lo cual tienen como único objetivo de calibración al caudal o gasto. Sin embargo, la calidad de los resultados dados por el modelo no depende tan solo de su complejidad, sino también de la disponibilidad de la información. Finalmente, como se mencionó previamente, el resultado de aplicar los modelos será el caudal a escala mensual en el punto de aforo de la cuenca.

Capítulo 2 Marco Teórico y Estado del Arte

2.1 Ciclo Hidrológico

Desde un enfoque conceptual, el ciclo hidrológico dentro de una cuenca hidrográfica sigue la misma dinámica que el ciclo hidrológico global, el cual representa el movimiento constante del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. En términos hidrológicos, el agua transita por distintas etapas: evaporación, condensación, precipitación, escorrentía superficial, infiltración y recarga de acuíferos (Chow et al, 1988).

En un sistema hidrográfico, la evaporación ocurre principalmente en los cuerpos de agua superficiales y en la capa superior del suelo. La evapotranspiración se da junto a este proceso, y se da cuando la vegetación transfiere vapor de agua a la atmósfera. Variables como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento y la cobertura vegetal influyen en la magnitud de estas pérdidas.

Respecto a la condensación, cuando el vapor de agua alcanza su punto de saturación, el enfriamiento de masas de aire húmedo favorece la formación de nubes. Este fenómeno puede producirse por ascenso orográfico, convección o sistemas frontales, dependiendo del contexto climático. Posteriormente, la precipitación se presenta como lluvia, nieve o granizo, según las condiciones térmicas y altitudinales predominantes.

Una vez ocurrido el evento de precipitación, parte del agua no se infiltra, sino fluye sobre el terreno, dando lugar al escurrimiento superficial que alimenta los cauces naturales y contribuye al caudal de los ríos. De manera simultánea, otra fracción se infiltra en el suelo, percola a través de los estratos subsuperficiales y participa en la recarga de acuíferos. La proporción entre escorrentía e infiltración depende de factores como la pendiente, la cobertura vegetal, la textura del suelo y la intensidad de la precipitación.

Finalmente, el agua que escurre superficial y subterráneamente converge hacia el cauce principal de la cuenca, integrándose progresivamente a sistemas fluviales de mayor jerarquía.

Este proceso asegura la continuidad del ciclo hidrológico y mantiene el equilibrio dinámico del sistema hídrico. No obstante, dicho equilibrio puede verse alterado por factores como el cambio climático, la pérdida de cobertura forestal y las modificaciones en el uso del suelo.

2.2 Los Modelos Hidrológicos a Utilizar

Los modelos hidrológicos son herramientas matemáticas o conceptuales que representan de manera simplificada los procesos físicos que ocurren dentro de una cuenca hidrográfica, con el propósito de reproducir y anticipar el comportamiento del sistema hídrico. En particular, los modelos precipitación-escorrentía describen la conversión de la lluvia en flujo superficial, permitiendo generar el hidrograma de flujo como respuesta al exceso de precipitación (Razad et al., 2018).

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse según distintos criterios. Desde una perspectiva conceptual, pueden ser empíricos, conceptuales o de base física, dependiendo del grado de representación de los procesos hidrológicos. Asimismo, pueden clasificarse como determinísticos o estocásticos, según consideren o no la variabilidad aleatoria de los fenómenos. En términos espaciales, pueden ser agregados (*lumped*), cuando representan la cuenca como una unidad homogénea, o distribuidos, cuando consideran la variabilidad espacial de los parámetros; mientras que, desde una perspectiva temporal, pueden operar a escala horaria, diaria, mensual o anual, dependiendo del objetivo del estudio.

Los modelos GR2M y Témez se clasifican como modelos hidrológicos conceptuales agregados y determinísticos, debido a que simulan el proceso precipitación-escorrentía mediante esquemas simplificados de almacenamiento a escala mensual, considerando la cuenca como una unidad homogénea. En cambio, el modelo Lutz-Scholz corresponde a un modelo conceptual agregado con componente estocástico, debido a que incorpora procedimientos probabilísticos para la generación y extensión de series mensuales de caudales.

2.2.1 Modelo GR2M.

Este modelo pertenece a los llamados “modelos GR”, en referencia a las palabras *Génie Rural* (ingeniería agrícola). Mouelhi et al. (2006) expone la estructura del modelo, su configuración y presenta un ejemplo de aplicación en su publicación “*Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model*”. Estos modelos fueron desarrollados por la Unidad de Investigación en Hidrología del *CEMAGREF Centre d'Antony* en Francia. En el año 1983, se propuso el primer modelo global para reconstruir caudales diarios, utilizando como variables la precipitación y la temperatura (con el objetivo de hallar la evapotranspiración potencial o EP a partir de esta). Desde entonces se han propuesto varias versiones de este modelo, cuya nomenclatura refleja tanto el número de parámetros considerados como la escala temporal de aplicación: J (diario), M (mensual) y A (anual).

Es así que el modelo GR2M depende de dos parámetros y maneja la información a paso mensual. Estos dos parámetros consisten en la precipitación y la temperatura. La versión del modelo que se utilizó para este trabajo fue la publicada por Mouelhi et al. en 2006. Este modelo ha sido aplicado en distintos contextos hidrológicos a nivel internacional y también en el Perú, como en el desarrollo del producto PISCO_HyM_GR2M para estimar el balance hídrico mensual a escala nacional, mostrando un desempeño satisfactorio en la reproducción del régimen mensual de caudales (Llauca et al., 2021). Su bajo requerimiento de datos y estructura parsimoniosa han favorecido su uso tanto en el ámbito académico como en estudios técnicos.

El modelo convierte la lluvia en flujo a través del uso de las funciones de producción y transferencia. El agua de la lluvia pasa por dos reservorios: el Reservorio Suelo y el Reservorio de Agua Gravitacional. Su configuración se muestra en la figura siguiente. P es la precipitación media de la cuenca, P_1 es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración potencial, P_2 es la percolación profunda, S es el almacenamiento del Reservorio Suelo al inicio del periodo de análisis, R es el almacenamiento inicial del Reservorio de Agua Gravitacional durante el

periodo de análisis y Q es el caudal a la salida de la cuenca. Finalmente, X_1 representa la capacidad máxima de almacenamiento del Reservorio Suelo, y X_2 , la del Reservorio de Agua Gravitacional.

No obstante, al tratarse de un modelo conceptual agregado, el GR2M presenta ciertas limitaciones. Al considerar la cuenca como una unidad homogénea, no representa explícitamente la heterogeneidad espacial de las precipitaciones ni de las características físicas del terreno. Asimismo, su desempeño está condicionado por la calidad de la información de entrada y del proceso de calibración de parámetros, pudiendo presentar limitaciones en cuencas con fuerte regulación antrópica o con procesos hidrológicos altamente complejos.

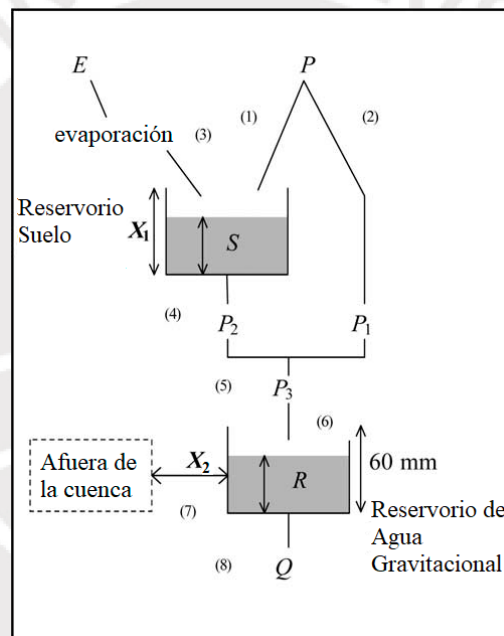


Figura 2.1 Esquema del modelo GR2M

Nota. Adaptado de "Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model", por Mouelhi et al., 2006.

Función de producción

Tal como se observa en el esquema de la Figura 2.1, la lluvia toma dos direcciones. Una parte de esta se dirige hacia el Reservorio Suelo y la otra, hacia el Reservorio de Agua Gravitacional. El cálculo del nuevo volumen de agua en el Reservorio Suelo (S_1) se realiza utilizando la siguiente expresión.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad (2.1)$$

Donde

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (2.2)$$

Luego, si se asume que antes de la infiltración el volumen de agua no sufre pérdidas y después de esta, se tiene que el valor de P_1 es el señalado por la siguiente ecuación.

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2.3)$$

Por otro lado, al mismo tiempo, el Reservorio Suelo pierde agua debido a la evapotranspiración, por lo cual el nuevo volumen de este se expresa por:

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi\left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad (2.4)$$

Donde

$$\psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (2.5)$$

Luego, se tiene que parte de este se transferirá hacia el Reservorio de Agua Gravitacional, mientras que lo restante se convertirá en el volumen inicial S del siguiente periodo de análisis. Este se calcula mediante la siguiente expresión, donde P_2 representa al volumen de agua percolada.

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad (2.6)$$

$$P_2 = S_2 - S \quad (2.7)$$

Función de transferencia

Una vez que se conoce el volumen de agua que percola, se puede hallar la precipitación que ingresa al Reservorio de Agua Gravitacional según la siguiente ecuación.

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2.8)$$

Ahora, el nuevo volumen de agua en este reservorio está dado por:

$$R_1 = R + P_3 \quad (2.9)$$

No obstante, considerando el intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, se realiza una corrección en el volumen del reservorio utilizando el coeficiente X_2 . Este es positivo. Valores superiores a 1 de X_2 indican un aporte adicional de agua a la cuenca; mientras que valores inferiores a 1 indican pérdidas.

$$R_2 = X_2 R_1 \quad (2.10)$$

Como último paso, cuando el Reservorio de Agua Gravitacional comienza a vaciarse, el caudal de salida se obtiene según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (2.11)$$

De esta manera, se tiene que para la calibración del modelo se deben optimizar dos variables: X_1 , la capacidad del Reservorio Suelo, dada en milímetros, y X_2 , el coeficiente de intercambio subterráneo, que es adimensional.

2.2.2 Modelo Lutz-Scholz.

El modelo fue desarrollado entre los años 1979 y 1980 por el experto en hidrología alemán Lutz Scholz mientras se encontraba laborando junto al organismo desconcentrado estatal Plan Meriss II (Plan de Mejoramiento de Riego en Sierra y Selva II) bajo la Cooperación Técnica de la República de Alemania con el Perú, para ser utilizado en cuencas de la sierra del Perú. Su estructura es combinada debido a que sigue un procedimiento determinístico para estimar las descargas mensuales para el año promedio, y un procedimiento estocástico para la generación de series extendidas de caudal. Este modelo ha sido ampliamente utilizado para la estimación de caudales mensuales en cuencas andinas, mostrando una correspondencia

aceptable con valores observados. Sin embargo, fue desarrollado y calibrado originalmente para los departamentos de Cusco, Huancavelica, Junín y Cajamarca, por lo que su aplicación en otras zonas debe realizarse con cautela debido a posibles diferencias climáticas e hidrológicas.

El objetivo del modelo es pronosticar caudales a escala mensual para cualquier uso, entre los cuales se encuentran los estudios hidrológicos para abastecimiento de agua, como el que se realizó en el presente trabajo. La estructura del modelo se obtuvo del reporte “Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana” publicado por el Plan Meris II en 1980.

Ecuación del balance hídrico

El balance hídrico mensual en el modelo está dado por la siguiente ecuación:

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad (2.12)$$

Donde CM_i es el caudal mensual, P_i es la precipitación mensual sobre la cuenca, D_i es el déficit de escurrimiento, G_i es el gasto de la retención y A_i es el abastecimiento de la retención. Todos medidos en mm/mes. El modelo considera que, en periodos de larga duración, como un año, el gasto y el abastecimiento de la retención son iguales, esto es $G_i = A_i$. Ello significa que ambos términos desaparecen de la ecuación. Luego, si se reemplaza el término $(P_i - D_i)$ por $(C * P)$ y se convierten las unidades de mm/mes a m^3 /seg, se tiene la siguiente expresión:

$$Q = c' * C * P * AR \quad (2.13)$$

La cual constituye la expresión básica del método racional, en la cual Q es el caudal anual en m^3 /seg. c' es el coeficiente de conversión de unidades en mes/seg, C es el coeficiente de escurrimiento, P es la precipitación media anual en mm/seg y AR es el área de la cuenca en m^2 .

Coeficiente de escurrimiento

Para calcular tanto este parámetro como el déficit de escurrimiento anual, se emplean las siguientes expresiones producto de observaciones hechas en Cusco y Huancavelica:

$$C = 3.16E12 * P^{-0.571} * EP^{-3.686} \quad (2.14)$$

$$D = 1380 + 0.872 * P + 1.032 * EP \quad (2.15)$$

Donde C es el coeficiente de escurrimiento, D es el déficit de escurrimiento en mm/año, P es la precipitación total anual en mm/año y EP es la evapotranspiración potencial anual según Hargreaves en mm/año.

Precipitación efectiva

Este parámetro se determina mediante el siguiente polinomio de quinto grado:

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5 \quad (2.16)$$

Donde PE es la precipitación efectiva mensual en mm, P es la precipitación total mensual en mm y a_i son los coeficientes del polinomio. A continuación, se presentan las expresiones para hallar el valor límite de la precipitación efectiva. Además, se presentan los tres conjuntos de coeficientes para hallar los valores de C por interpolación que serán utilizados para hallar la PE mediante la expresión del método racional.

Curva I: PE = P - 120.6 para P > 177.8 mm/mes

Curva II: PE = P - 86.4 para P > 152.4 mm/mes

Curva III: PE = P - 59.7 para P > 127.0 mm/mes

Tabla 2.1 Coeficientes para el cálculo de la PE

	Curva I	Curva II	Curva III
a_0	-0.018	-0.021	-0.028
a_1	+0.01850	+0.1358	+0.2756
a_2	+0.001105	-0.002296	-0.004103
a_3	-1 204 E-08	+4 349 E-08	+5 534 E-08
a_4	+144 E-09	-89 E-09	+124 E-09
a_5	-285 E-12	-879 E-13	-142 E-11

Nota. Tomado de "Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana", por Plan Meriss II (Perú). 1980.

Retención de la cuenca

Asumiendo que, para el año promedio, el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca se encuentran en equilibrio, y que el caudal total corresponde a la precipitación efectiva anual, la contribución de la reserva hídrica al caudal puede determinarse mediante las siguientes expresiones.

$$R_i = CM_i - PE_i \quad (2.17)$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (2.18)$$

Relación entre descargas y retención

Durante las estaciones secas, el gasto de la retención corresponde al caudal o descarga básico del río. Es así que la reserva de agua de la cuenca se va agotando a lo largo de dicha estación. Por otro lado, en esta temporada el caudal base puede ser calculado según la siguiente expresión:

$$Q_t = b_0 Q_0 \quad (2.19)$$

$$b_0 = e^{-at} \quad (2.20)$$

Donde Q_t es el caudal en el tiempo t , Q_0 es el caudal inicial, a es el coeficiente de agotamiento y t es el tiempo medido en días.

Coefficiente de agotamiento

Para determinar este parámetro se utilizan las siguientes ecuaciones desarrolladas para los siguientes tipos de cuencas:

- Cuencas con agotamiento muy rápido. Cuencas con temperaturas elevadas ($> 10 \text{ }^\circ\text{C}$) y con una retención anual de reducida (50 mm/año) a mediana (80 mm/año).

$$a = -0.00252(\ln AR) + 0.034 \quad (2.21)$$

- Cuencas con agotamiento rápido. Cuencas con una retención reducida a mediana y con vegetación poco desarrollada.

$$a = -0.00252(\ln AR) + 0.030 \quad (2.22)$$

- Cuencas con agotamiento mediano. Cuencas con una retención mediana y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados).

$$a = -0.00252(\ln AR) + 0.026 \quad (2.23)$$

- Cuencas con agotamiento reducido. Cuencas con una alta retención (> 100 mm/año) y vegetación mezclada.

$$a = -0.00252(\ln AR) + 0.023 \quad (2.24)$$

Donde a es el coeficiente de agotamiento, AR es el área de la cuenca en km^2 y EP es la evapotranspiración potencial anual en mm.

Abastecimiento de la retención

El proceso de recarga de la retención de la cuenca se produce durante la estación lluviosa. Se proponen los siguientes coeficientes mensuales que representan, en porcentaje, la fracción del abastecimiento total anual para cuatro regiones:

Tabla 2.2 Almacenamiento hídrico durante la época lluviosa (%)

Región	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
Cusco	0	5	35	40	20	0
Huancavelica	10	0	35	30	20	5
Junín	10	0	25	30	30	5
Cajamarca	25	5	0	20	25	35

Nota. Tomado de "Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana", por Plan Meriss II (Perú). 1980.

De esta forma, el ingreso de agua a la reserva de la cuenca se expresa como:

$$A_i = a_i \left(\frac{R}{100} \right) \quad (2.25)$$

Donde A_i es el abastecimiento mensual (mm/mes), a_i es el coeficiente de abastecimiento (%) y R es la retención de la cuenca anual (mm/año). Según el reporte, para la cuenca Vilcanota se propone el valor de retención de 80 mm/año.

Determinación del caudal mensual para el año promedio

Finalmente, se halla el caudal mensual según la ecuación de balance hídrico:

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (2.26)$$

Donde CM_i es el caudal, PE_i es la precipitación efectiva, G_i es el gasto de la retención y A_i es el abastecimiento, todos medidos en mm/mes.

Consideraciones para el modelo

Al momento de aplicar el modelo se deben tomar en cuenta ciertas restricciones y/o consideraciones:

- En cada uno de los modelos parciales se respetarán los rangos de calibración establecidos.
- El modelo solo puede usarse para calcular caudales mensuales promedio.
- Los registros calculados para la estación seca presentan son más confiables que los calculados para la estación lluviosa.
- El modelo solo puede aplicarse en las cuencas para las que se han calibrado los parámetros.

2.2.3 Modelo Témez.

Consiste en un modelo simplificado de conversión de precipitación a esorrentía de paso mensual. Fue propuesto por el Dr. Ing. José R. Témez Peláez en su publicación “Modelo matemático de transformación “precipitación-aportación”” bajo el encargo de la Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL) el año 1977. Presenta limitaciones asociadas a su carácter conceptual y agregado, debido a que considera la cuenca como una unidad homogénea y no representa explícitamente la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos. Además,

al trabajar generalmente a escala mensual, no reproduce adecuadamente eventos extremos de corta duración.

Se trata de un modelo hidrológico continuo, concentrado y conceptual que asume un perfil del suelo que se compone de una zona insaturada en la parte superior y otra saturada en profundidad. Asimismo, supone que el comportamiento del suelo se asemeja al de un reservorio subterráneo que desagua a los cuerpos superficiales (Oñate-Valdivieso et al., 2016). La precipitación y la evapotranspiración potencial son sus entradas principales, mientras que su salida corresponde al caudal total del río. De acuerdo con el esquema del modelo, la escorrentía total resulta de la suma de dos componentes diferenciadas: una superficial, asociada al agua de precipitación que no infiltra ni se evapora, y otra subterránea, obtenida mediante un modelo simplificado tipo celda.



Figura 2.2 Esquema del flujo del agua del modelo Témez

Nota. Tomado de “Hidrología aplicada”, por Terán, s/f.

Siguiendo el esquema del modelo, la lluvia (P) se convierte en evapotranspiración (EP) o en excedente (T). Una parte de este excedente discurre en la superficie (Q_{sup}), mientras que la otra se infiltra hasta el acuífero (I). La escorrentía superficial es evacuada por el cauce, mientras que la infiltración se libera de los reservorios subterráneos al cabo de un tiempo (Q_{sub}). El excedente (T) se halla de la siguiente forma:

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_0 \quad (2.27)$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{(P_i + \delta - 2P_0)} \quad \text{si } P_i > P_0 \quad (2.28)$$

Donde

$$\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + EP_i \quad (2.29)$$

$$P_0 = C(H_{m\acute{a}x} - H_{i-1}) \quad (2.30)$$

P_i es la precipitación en mm, P_0 es el umbral de escorrentía en mm debajo del cual no se produce escorrentía, T_i es el excedente en mm, δ es el déficit máximo de humedad del suelo en mm, $H_{m\acute{a}x}$ (o Φ) es la capacidad máxima de retención de humedad en el suelo en mm, H_{i-1} es la humedad en el suelo en el anterior mes en mm, EP_i es la evapotranspiración potencial en mm y C es un parámetro del modelo (con valores del orden de 0.3).

La humedad en el suelo pasado el tiempo de análisis está dada por:

$$H_i = M\acute{a}x[0, (H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)] \quad (2.31)$$

Y la evapotranspiración real (ER) está dada por:

$$ER_i = M\acute{i}n[(H_{i-1} + P_i - T_i), EP_i] \quad (2.32)$$

Luego, se propone una infiltración I_i que depende del excedente T_i y del parámetro de infiltración máxima $I_{m\acute{a}x}$. Estas tres variables se encuentran en mm. Se tiene la siguiente expresión empírica para la infiltración:

$$I_i = \frac{I_{m\acute{a}x} T_i}{T_i + I_{m\acute{a}x}} \quad (2.33)$$

Por otro lado, en la siguiente figura se grafican algunas de las relaciones entre las variables descritas:

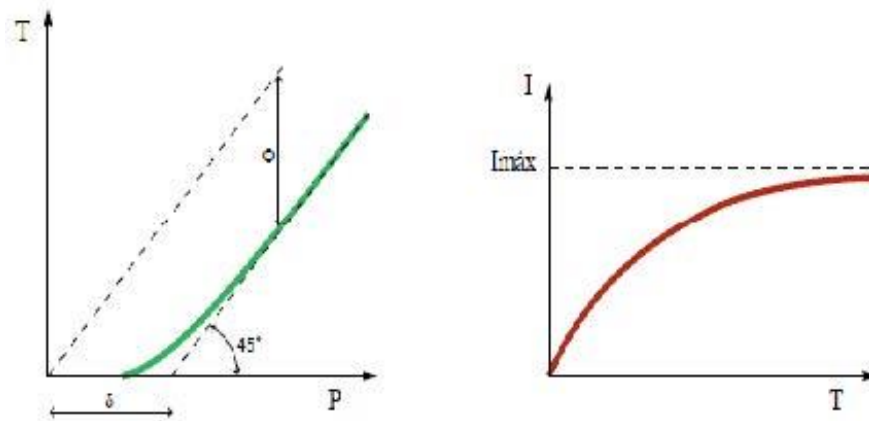


Figura 2.3 Ley de excedentes (izq.) y Ley de infiltración (der.)

Nota. Tomado de “Hidrología aplicada”, por Terán, s/f.

Respecto a la ley de excedentes, se puede apreciar que luego de caer la lluvia, el excedente no se forma hasta un poco antes de que esta logra compensar el déficit máximo de humedad en el suelo, δ . Además, el excedente nunca puede llegar a ser igual a la precipitación, por lo que estos siempre están diferenciados por el valor de Φ o la capacidad máxima de humedad en el suelo. Asimismo, se puede inferir de la ley de infiltración que la infiltración se incrementa junto al excedente hasta cierto valor, donde comienza a volverse asintótica, teniendo como límite el valor de $I_{\text{máx}}$.

Luego, la infiltración (I_i) se convierte en una recarga para el acuífero, esto es, R_i , mientras que el resto del excedente se convierte en agua superficial según la siguiente expresión.

$$E_i = T_i - I_i \quad (2.34)$$

Por otra parte, el drenaje del acuífero se modela según la siguiente expresión:

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha t} \quad (2.35)$$

Donde Q_i es la descarga en el instante i , α es el coeficiente de descarga del acuífero y t es el tiempo transcurrido entre los instantes $i-1$ e i . Luego, la relación entre el caudal de descarga, Q_i , y el volumen almacenado en el acuífero, V_i , está dada por:

$$Q_i = \alpha V_i \quad (2.36)$$

Al asumir que la descarga generada por la infiltración se concentra en la mitad del periodo, el comportamiento del caudal subterráneo está dado por:

$$Q_i = Q_{i-1}e^{-\alpha t} + \alpha R_i e^{-\alpha/2} \quad (2.37)$$

Donde R_i es la recarga para el acuífero, la cual coincide con la infiltración I_i . Por otro lado, el aporte subterráneo durante dicho periodo, $A_{SUB i}$, se expresa como:

$$A_{SUB i} = V_{i-1} - V_i + R_i t \quad (2.38)$$

Luego, el aporte total, $A_{T i}$, se da al integrar la escorrentía superficial ($T_i - I_i$) y el aporte subterráneo, esto es:

$$A_T = T_i - I_i + A_{SUB i} \quad (2.39)$$

Por otro lado, los parámetros del modelo consisten en: $H_{m\acute{a}x}$ (o también Φ), la capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo en mm; C , el parámetro de excedente (adimensional); $I_{m\acute{a}x}$, la capacidad máxima de infiltración en mm; y α , el coeficiente de la rama de descarga en día⁻¹. Estos parámetros responden a las características propias de la cuenca y deben calibrarse. Finalmente, los valores iniciales a establecer por el usuario son: S_0 , la humedad inicial del suelo en mm, y Q_0 , el almacenamiento inicial en el acuífero en mm.

2.3 Antecedentes de Trabajos Similares

2.3.1 Publicación sobre la aplicación del método Lutz-Scholz (1980).

Este fue el primer estudio encargado de la generación de los caudales medios mensuales para el río Vilcanota data del año 1980. Este fue publicado por el organismo desconcentrado Plan Meriss II, bajo el título “Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana”. Dicho documento hizo pública la aplicación del método Lutz-Scholz (aún no presentado como tal) y se incluyeron todas las ecuaciones, supuestos y la secuencia de pasos a seguir.

Como su nombre lo indica, este estudio se realizó para cuatro regiones en la sierra peruana: Cusco, Huancavelica, Junín y Cajamarca. Para cada una se definieron parámetros exclusivos. En la publicación se enfatiza que este método no debe aplicarse en regiones diferentes.

El documento, en la sección final “Ejemplos Prácticos”, presenta las descargas medias mensuales en la cuenca alta del río Vilcanota (7 145 km²) para el año promedio, una descripción sobre estos valores y otros resultados productos del procedimiento que se siguió para obtener dichos caudales. Además, presenta los caudales para períodos extendidos, los cuales son otro conjunto de *outputs* del método Lutz-Scholz. Estos son los caudales medios mensuales del río Vilcanota, a partir de los cuales se pudieron establecer comparaciones.

Tabla 2.3 Caudales mensuales en el río Vilcanota para el año promedio

MES	CAUDALES MENSUALES		
	Generados		Aforados
	mm/mes	m ³ /seg	m ³ /seg
Jul.	10.9	29.1	26.8
Ago.	9.6	25.6	24.4
Set.	10.1	27.8	25.7
Oct.	11.4	30.4	30.4
Nov.	14.1	38.9	36.5
Dic.	33.4	89.1	59.6
Ene.	44.0	117.4	120.4
Feb.	66.7	197.0	166.8
Mar.	63.3	168.1	147.2
Abr.	28.9	79.7	92.4
May.	17.6	47.0	43.8
Jun.	13.1	36.1	31.7
AÑO	323.2	73.2	66.6

Nota. Tomado de “Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana”, por Plan Meriss II (Perú). 1980.

Cabe mencionar que dichos resultados se obtuvieron para el punto del río en donde se encuentra la estación Pisac (ver Figura 4.40), la cual era la única estación hidrométrica en funcionamiento desde el año 1964.

2.3.2 Generación de caudales mensuales en la cuenca del río Vilcanota (2012).

El informe “Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota” fue elaborado por el SENAMHI en el año 2012. Utilizando el modelo hidrológico GR2M, se usó información del satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) para modelar los caudales promedios mensuales de la cuenca del río Vilcanota, la misma que se encuentra en la Figura 2.4, utilizando el modelo hidrológico GR2M. El informe tuvo como objetivos: primero, validar y rectificar los datos mensuales del satélite TRMM con los de estaciones terrestres; y, segundo, calibrar y validar el modelo GR2M con datos mensuales de precipitación observada y del satélite TRMM.

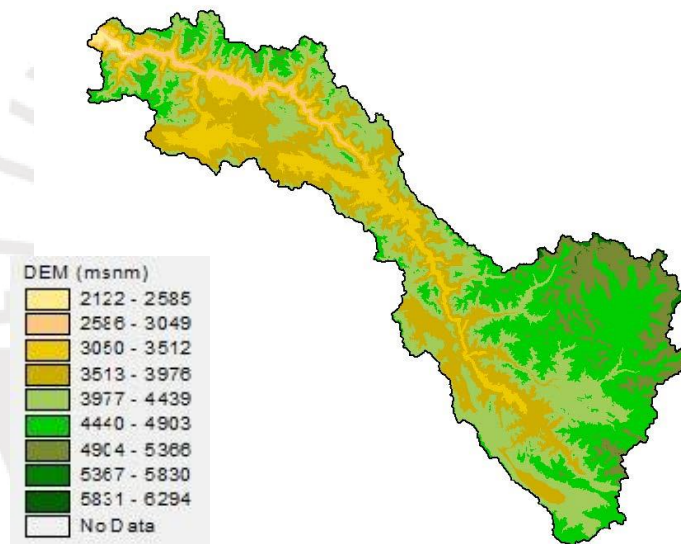


Figura 2.4 Modelo numérico del terreno de la cuenca Vilcanota utilizado

Nota. Tomado de “Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota”, por SENAMHI, 2012.

En el informe se realizaron tres modelizaciones; donde la Modelización 1 se realizó con los valores observados de precipitación, la Modelización 2, con la información del satélite TRMM sin corregir, y la Modelización 3, con la información del satélite TRMM corregida. En todas las modelizaciones se escogió un periodo de calibración de siete años (1998-2004) y un

periodo de validación de seis años (2005-2010). A continuación, se muestra la eficiencia que alcanzó cada una, medida por los estadísticos de Nash-Sutcliffe (NSE) y %Volumen (%V).

Tabla 2.4 Eficiencia de los Modelos 1, 2 y 3

	Estadístico	Calibración (1998-2004)	Validación (2005-2010)
Modelo 1 (P_obs)	NSE	0.91	0.81
	%V	93	48
Modelo 2 (P_TRMM)	NSE	0.69	0.72
	%V	76	76
Modelo 3 (P_TRMM corregido)	NSE	0.82	0.78
	%V	86	82

Nota. Adaptado de “Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota”, por SENAMHI, 2012.

A partir de la información obtenida por los estadísticos, el informe afirma que, en términos generales, la Modelización 1 arroja los mejores resultados, lo cual corresponde al uso de datos de precipitación basados en observaciones directas. Por otro lado, en el siguiente gráfico se muestra la comparación de los caudales simulados correspondientes a los Modelos 1, 2 y 3, con respecto al caudal observado.

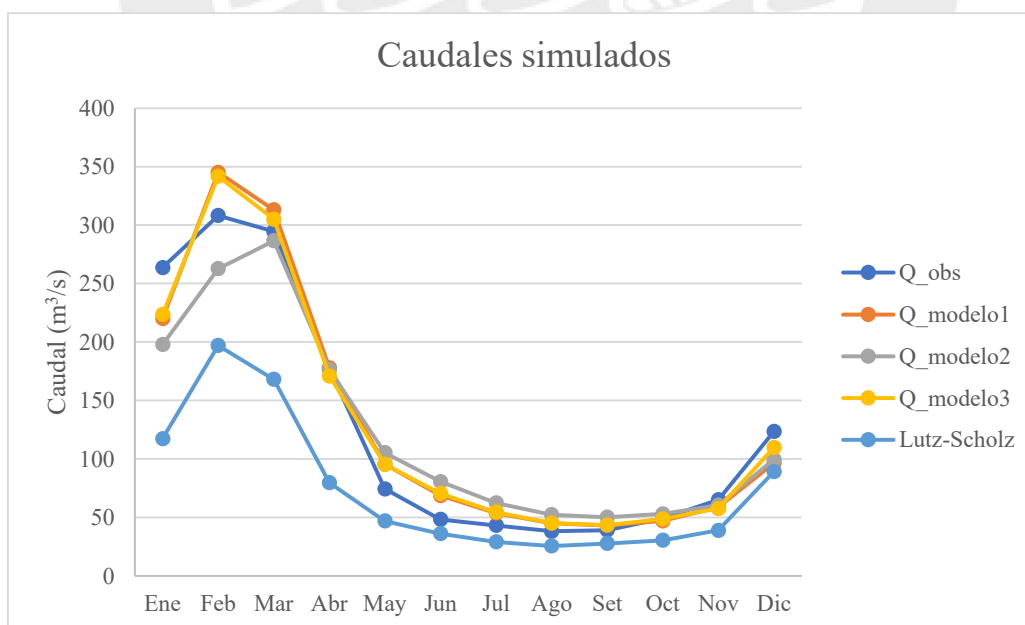


Figura 2.5 Ciclo anual de los caudales simulados y observados

Nota. Adaptado de “Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota”, por SENAMHI, 2012.

Se puede ver que estos presentan un patrón cualitativo semejante; aunque, en términos cuantitativos, surgen pequeñas discrepancias, sobre todo durante los periodos Enero-Marzo y Mayo-Julio. En el caso del Modelo 1 y del Modelo 3, se puede observar que este subestima los caudales en Diciembre y Enero, y los sobreestima en Febrero y Marzo y en el periodo Mayo-Agosto. Por otro lado, en el caso del Modelo 2, este tiende a subestimar los caudales en el periodo Diciembre-Febrero, y a sobreestimarlos en el periodo Mayo-Agosto. Finalmente, la tabla a continuación presenta estos valores:

Tabla 2.5 Caudales mensuales en el río Vilcanota para el año promedio

Caudales observados en m ³ /a													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	263.7	308.2	294.7	177.3	74.39	48.32	43.11	38.14	39.1	49.27	65.11	123.5	127.1
Desv. Est.	82.62	66.84	80.89	62.98	19.06	11.57	11.75	6.59	5.741	10.04	21.5	35.85	22.47
CV	0.31	0.21	0.27	0.35	0.25	0.23	0.27	0.17	0.14	0.20	0.33	0.29	0.177
Caudales Modelización 1 en m ³ /a													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	220.1	345.1	313	177.8	95.43	68.71	53.69	45.08	43.1	47.12	58.74	96.42	130.4
Desv. Est.	59.16	77.93	93.73	41.53	17.11	8.629	9.769	6.927	7.012	10.96	18.2	34.23	25.5
CV	0.26	0.22	0.3	0.23	0.17	0.12	0.18	0.15	0.16	0.23	0.31	0.35	0.19
Caudales Modelización 2 en m ³ /a													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	197.8	262.8	286.6	176.4	105.4	80.63	62.34	52.37	50.22	52.99	60.48	99.48	125.6
Desv. Est.	78.46	96.73	127.9	47.06	23.79	16.74	10.43	7.276	9.136	11.31	13.41	46.84	33.4
CV	0.39	0.34	0.44	0.26	0.22	0.20	0.16	0.13	0.18	0.21	0.22	0.47	0.26
Caudales Modelización 3 en m ³ /a													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	223.5	341.7	305	170.9	95.43	70.41	54.44	45.2	43.38	48.63	57.66	109.7	130.5
Desv. Est.	98.74	106.2	89.6	33.94	15.06	11.32	8.889	6.266	7.067	11.27	14.33	68.98	32.1
CV	0.44	0.311	0.29	0.19	0.15	0.16	0.16	0.13	0.16	0.23	0.24	0.62	0.24

Nota. Adaptado de “Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota”, por SENAMHI (Perú). 2012.

2.3.3 Modelación eco-hidrológica en la cuenca del río Vilcanota (2020).

El artículo “Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru” fue publicado tiempo después, en el año 2020. En este artículo se dieron a conocer nuevos conocimientos acerca de la hidrología de la región, los cuales se obtuvieron luego de aplicar un determinado

marco de trabajo para la calibración del modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Además, se proponen dos objetivos: desarrollar un marco de trabajo comprensivo para la calibración multi-objetivo usando datos de vegetación obtenidos por sensores remotos y “firmas hidrológicas” (tales como la Curva de Duración de Caudales, CDC, y el Índice de Flujo Base, ÍFB) en adición a la descarga, y aplicar este marco para la calibración del modelo SWAT en una cuenca andina típica. A continuación, se presentan el mapa de ubicación de la cuenca, de las elevaciones del terreno y de los usos de tierra utilizados en el artículo.

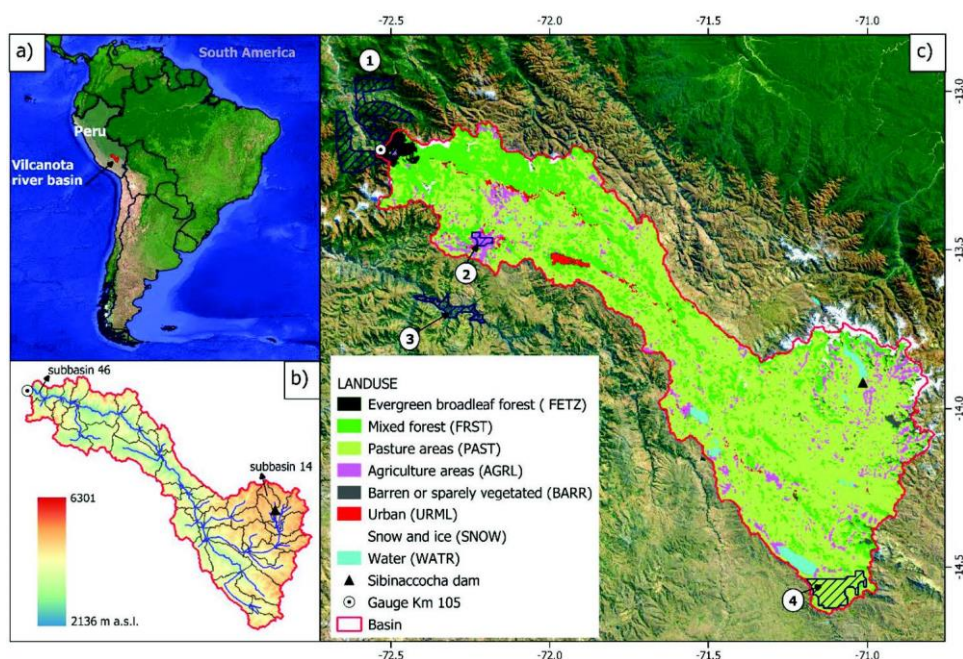


Figura 2.6 (a) Ubicación de la cuenca del río Vilcanota; (b) Elevación del terreno, subcuencas y red hídrica; y (c) Mapa del uso de tierra. Las zonas achuradas representan zonas de muestreo para las principales clases de vegetación (1: FETZ, 2: AGRL, 3: FRST y 4: PAST)

Nota. Tomado de “Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru”, por Fernandez-Palomino et al., 2020.

El artículo comienza señalando que la mayoría de estudios hidrológicos dependen de un modelo calibrado solo en base a la descarga. Sin embargo, según el artículo, juzgar la confiabilidad de un modelo según dicha calibración es problemático y, sobre todo, no garantiza una correcta representación de los procesos hidrológicos internos. Es por ello que, para entender los procesos hidrológicos y la dinámica de la vegetación dentro de una cuenca, se han

utilizado los frecuentemente llamados modelos eco-hidrológicos de cuencas fluviales (Krysanova y Arnold, 2008), entre estos el modelo SWAT.

Cabe mencionar que, para la presente tesis, el aporte más significativo del artículo consiste en los conocimientos hidrológicos obtenidos producto de la modelación hidrológica multi-objetivo realizada, los cuales son los siguientes. La evapotranspiración representa el 50% de la precipitación anual promedio. El flujo base es el principal componente del caudal a largo plazo (78% de este, en promedio) con una importante contribución de los acuíferos profundos que sostienen el flujo base de la estación seca. Además, los resultados ilustran que las áreas cubiertas por pasturas ofrecen mejores servicios hidrológicos en cuanto al rendimiento del agua y flujo base en comparación a otros usos de la tierra.

Finalmente, la eficacia del modelo SWAT en la representación detallada de los procesos relacionados con la vegetación, el caudal y el caudal base puede contribuir a mejorar la administración y planificación de los recursos hídricos en la cuenca del Vilcanota y captaciones de agua similares. Sin embargo, su aplicación requiere un conjunto de datos amplio y detallado (datos de suelos, uso del suelo, topografía y variables climáticas complementarias), la cual no se encuentra disponible para el presente trabajo. En ese sentido, de contarse con dicha información, el modelo SWAT constituiría una alternativa metodológica adecuada y técnicamente más robusta para el estudio hidrológico de la cuenca.

2.4 Hidrología de la Cuenca Urubamba

2.4.1 Ubicación y características geográficas.

Al sur del Perú se ubica la cuenca del río Vilcanota, dentro de la región Cusco, y constituye el tramo alto del sistema hidrográfico Vilcanota-Urubamba, perteneciente a la vertiente amazónica (ANA, 2019). Su extensión es aproximadamente 7 000 km² y comprende principalmente territorios de las provincias de Canchis, Quispicanchi, Cusco, Calca y Anta. El

río Vilcanota nace en las proximidades del nevado Cunurana, en la cordillera Vilcanota, y discurre en dirección sureste a noroeste hasta unirse aguas abajo con el río Urubamba.

La cuenca presenta un marcado gradiente altitudinal, con elevaciones que superan los 6 000 m.s.n.m. en la cordillera Vilcanota —donde destaca el nevado Ausangate— y descienden hasta aproximadamente 2 800–3 000 m.s.n.m. en el valle del Cusco. Esta variación altitudinal determina la presencia de diversos pisos ecológicos, desde zonas de puna altoandina con cobertura de pastizales naturales y presencia de glaciares, hasta valles interandinos con mayor aptitud agrícola y asentamientos urbanos.

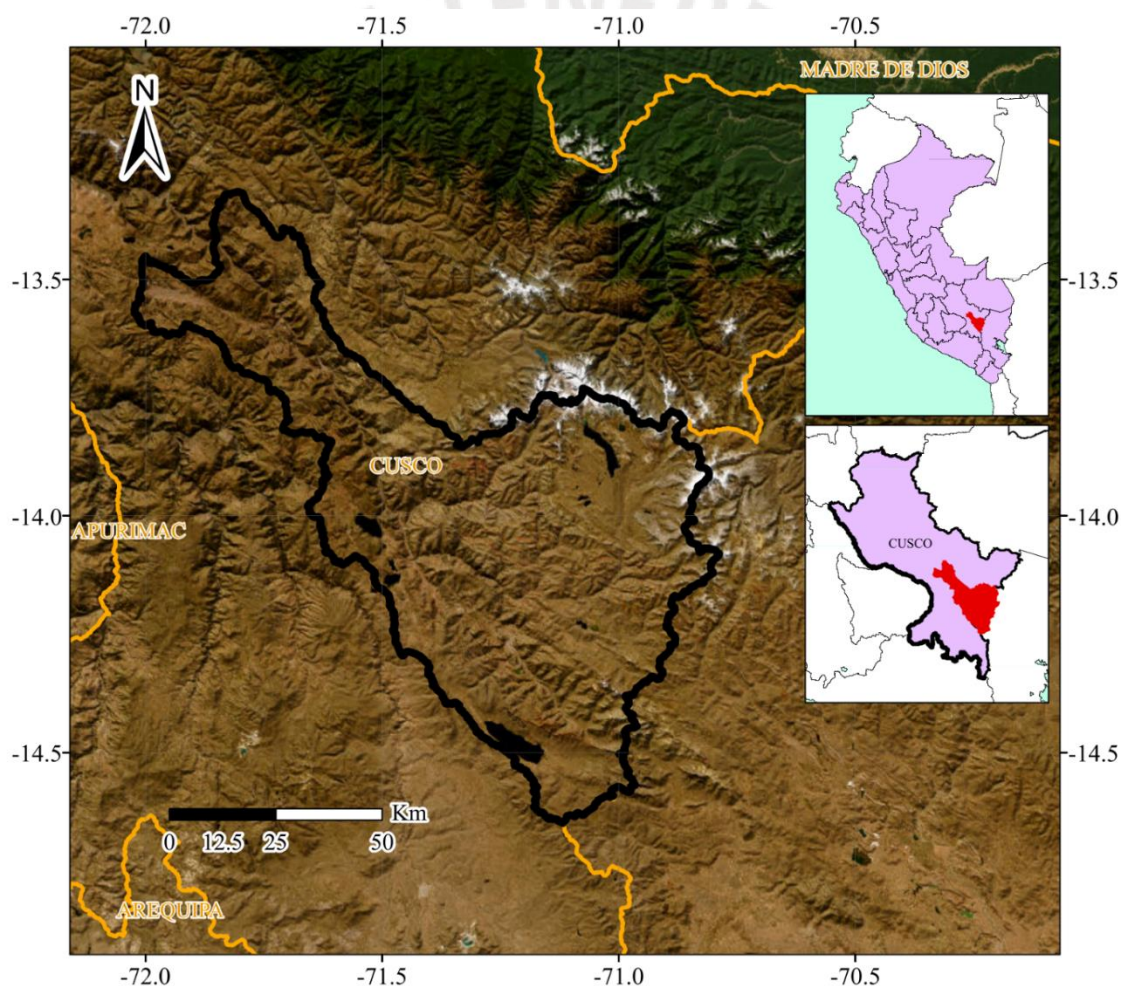


Figura 2.7 Ubicación de la cuenca Vilcanota-Písac

Geomorfológicamente, la parte alta de la cuenca está dominada por relieves montañosos de origen tectónico-glaciario, con presencia de morrenas, lagunas altoandinas y depósitos fluvio-glaciares. En los sectores medios predominan terrazas fluviales, abanicos aluviales y

depósitos coluviales asociados a procesos de erosión y transporte sedimentario propios de cuencas de alta pendiente. La red de drenaje presenta un patrón predominantemente dendrítico, alimentado por tributarios de régimen pluvial y pluvio-glacial.

En términos climáticos, la cuenca se caracteriza por una marcada estacionalidad, donde la temporada de lluvias se concentra entre noviembre y marzo, mientras que la estación seca predomina desde abril hasta octubre. Las precipitaciones presentan variabilidad espacial significativa debido al efecto orográfico y a la altitud, mientras que las temperaturas disminuyen progresivamente en función de la elevación. La presencia de glaciares en la cordillera Vilcanota ha contribuido históricamente al sostenimiento de caudales en época seca; sin embargo, el retroceso glaciar observado en las últimas décadas constituye un factor relevante en la dinámica hidrológica de la cuenca.

2.4.2 Precipitación.

En primer lugar, en la temporada de lluvias de la sierra, se produce una intensificación de los vientos orientales en todas las capas atmosféricas, lo que favorece la llegada de humedad a la cuenca amazónica a través de la advección (Ávalos, 2009). De acuerdo a Cubasch (1995), las lluvias en la cuenca Urubamba, la mayor unidad hidrográfica al que pertenece la cuenca en estudio, ocurren cuando la humedad transportada desde el este es dirigida y contenida por las empinadas laderas de la cuenca, la cual está orientada aproximadamente hacia el norte. Este flujo, al recorrer una distancia más corta que en otras cuencas de la sierra, conserva mayor humedad y es más propenso a inestabilizarse, lo cual propicia mayores cantidades de precipitación, especialmente en el Bajo Urubamba.

A continuación, se expondrán los patrones de precipitación que han sido observados en la cuenca del Alto Urubamba, a partir del informe técnico “Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100” (SENAMHI, 2007). En primer lugar, el documento menciona que las zonas de estudio consistieron en las partes alta y media de la

cuenca, debido a su relevancia para la disponibilidad hídrica y del retroceso glaciar. Las lluvias en la región se distribuyen en dos fases bien definidas anualmente: un periodo de mayor humedad que va desde septiembre hasta abril, y una etapa seca o de baja pluviosidad que ocurre entre mayo y agosto (SENAMHI, 2007). La estación lluviosa en la cuenca se manifiesta principalmente durante los meses de verano, con enero como el mes que registra la máxima precipitación. Por el contrario, los meses invernales se asocian con las menores cantidades de lluvia, destacándose julio como el mes con la mínima precipitación.

La siguiente tabla muestra los datos de precipitación, tanto estacionales como anuales, captados por las estaciones meteorológicas que disponen del registro más extenso dentro de la cuenca; además, se adjunta la siguiente figura con la ubicación de dichas estaciones.

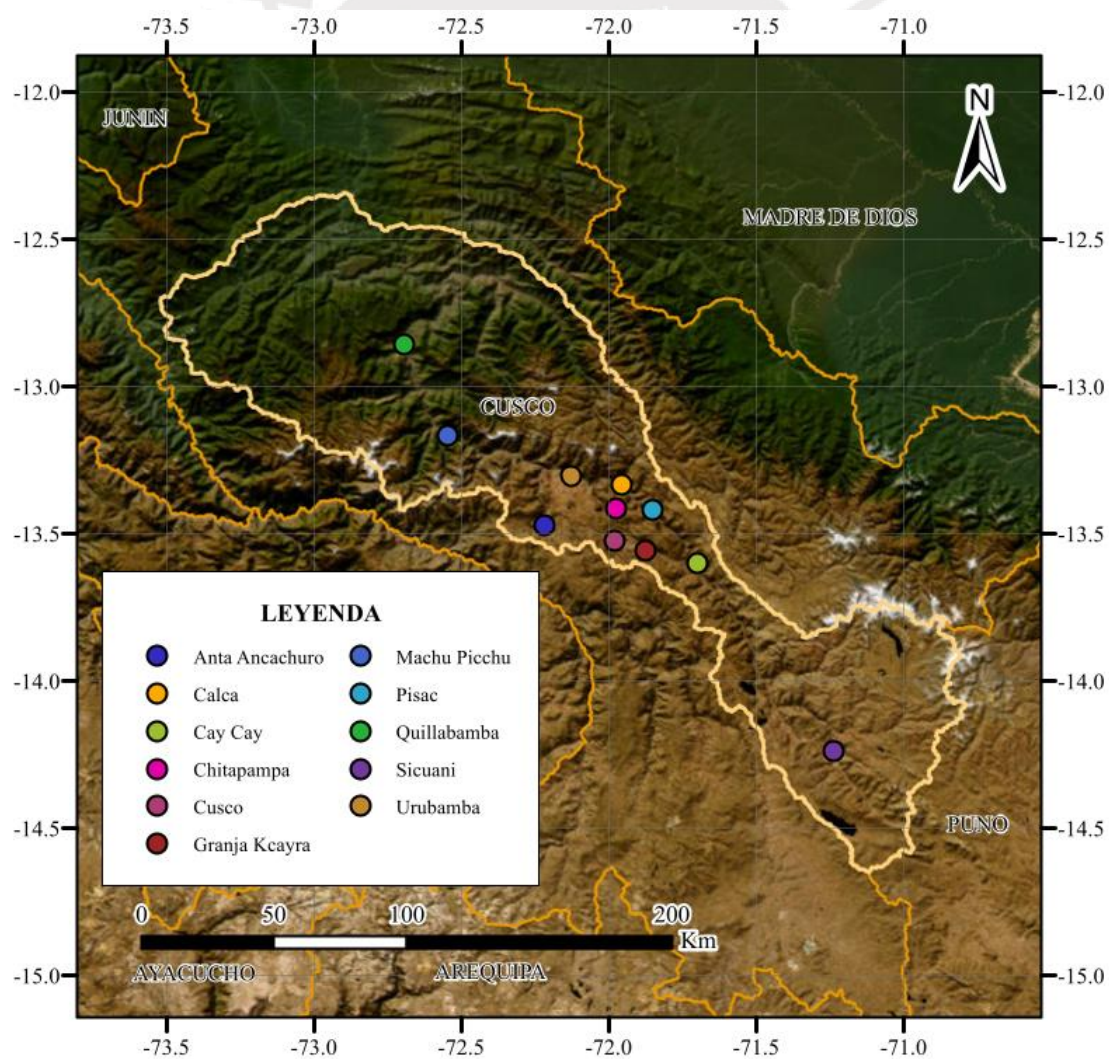


Figura 2.8 Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Tabla 2.6 Precipitación acumulada anual (mm/año) y estacional (mm/trimestre) en la cuenca Urubamba (1971-2000)

Estación	Anual	DEF	MAM	JJA	SON
Anta Ancachuro	870.4	501.2	191.0	16.0	162.2
Calca	539.6	299.8	123.7	15.2	101.0
Cay Cay	330.9	183.1	85.2	8.6	54.1
Chitapampa	682.9	384.1	141.6	18.3	139.0
Cusco	707.0	385.0	158.3	18.5	145.1
Granja Kcayra	666.9	367.9	145.1	12.4	141.5
Pisac	586.2	312.9	161.8	15.9	95.6
Quillabamba	1283.0	602.7	354.6	73.0	252.7
Sicuani	594.1	318.6	151.0	14.4	110.2
Urubamba	453.0	242.1	95.9	13.9	83.1
Machu Picchu	2009.6	870.3	557.2	166.0	416.2

Nota. Tomada de “Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100”, de SENAMHI, 2007.

Al observar la Tabla 2.6 se deduce que en todas las estaciones el trimestre DEF tiene la precipitación más alta, seguido del trimestre MAM, luego el trimestre SON, con valores ligeramente menores, y, por último, el trimestre JJA, el menos lluvioso. En el trimestre DEF las precipitaciones superan los 300 mm, a excepción en las zonas ubicadas cerca de las estaciones Cay Cay y Urubamba. Por otro lado, en el trimestre JJA las precipitaciones no superan los 20 mm, a excepción de los alrededores de las estaciones Quillabamba y Machu Picchu, que están localizadas en la parte baja de la cuenca, y registran precipitaciones mucho mayores durante todo el año.

La siguiente figura, tomada del informe técnico “Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100”, demuestra que el ciclo anual de la precipitación en las estaciones hidrometeorológicas localizadas en la cuenca Alto Urubamba es comparable. Tal como fue mencionado anteriormente, las estaciones localizadas en la parte inferior de la cuenca presentan precipitaciones más intensas. Esto demuestra lo explicado anteriormente sobre el comportamiento de las precipitaciones a nivel geográfico de la cuenca. Esta tendencia se tomó en cuenta en el análisis de consistencia de información del presente trabajo.

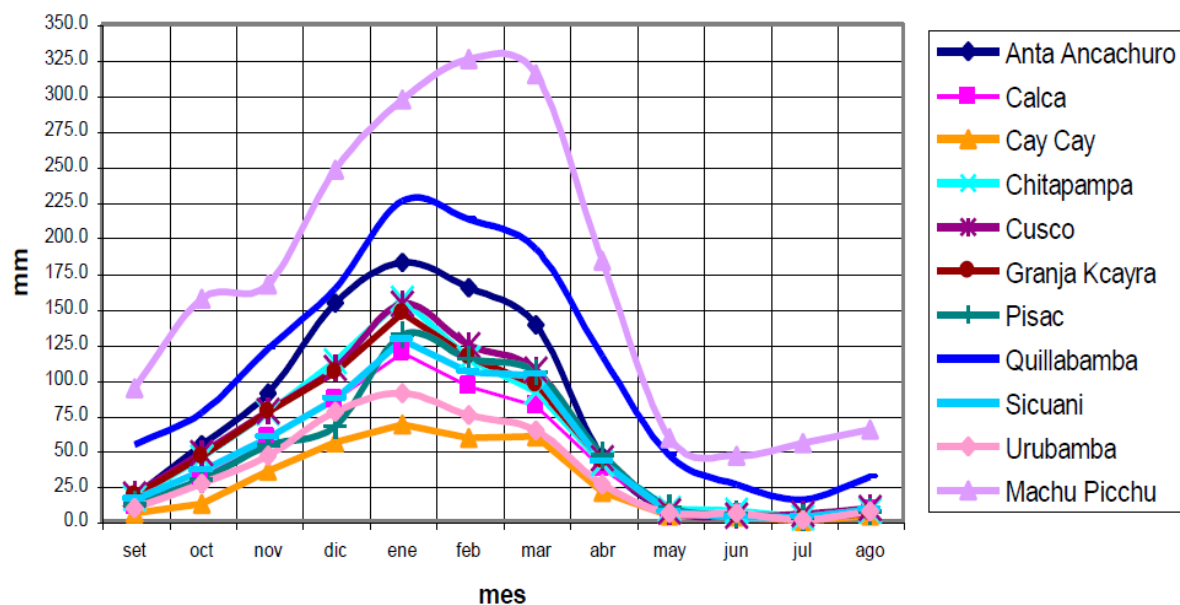


Figura 2.9 Ciclo anual de la precipitación en diferentes sectores de la cuenca Urubamba (mm/mes)

Nota. Tomada de “Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100”, de SENAMHI, 2007.

2.4.3 Hidrografía y régimen hidrológico de la cuenca Urubamba.

En la presente sección se abordará, en primer lugar, la hidrografía de la cuenca, describiendo la configuración de su red de drenaje, los principales ríos y sus confluencias, así como la delimitación y organización del sistema fluvial. Posteriormente, se desarrollará el análisis del régimen hidrológico, considerando el comportamiento temporal de los caudales, la escorrentía y la estacionalidad del flujo de agua en la cuenca. Se adjunta el siguiente mapa para ello, el cual contiene los diferentes ríos y afluentes que existen dentro de la cuenca:

En primer lugar, según la ANA, la cuenca Urubamba tiene tres principales sistemas de drenaje: los ríos Vilcanota, Mapacho y Yanatile. El río Vilcanota tiene su origen en los nevados del abra La Raya, situados a 4 326 msnm y fluye hacia el noreste. En su camino recibe los aportes del río Langui, Salcca, Pitumarca, Tigremayo, Huatanay, Huarcocondo, Santa Teresa y Vilcabamba. Al final, confluye con el río Yanatile, para formar el río Urubamba.

Por su parte, la mayor parte del río Mapacho tiene su origen en las lagunas y derretimientos de nieve en la cordillera del Nevado Ocongate. Este recibe los aportes de los ríos Ccatcca, Pichihua, Jachacalla y Churo. Su cuenca se distingue por un relieve generalmente escarpado y encañonado, con sectores planos en ciertas zonas. Más abajo, el río Mapacho adopta el nombre de Yavero y, finalmente, confluye con el río Urubamba.

Por otro lado, el río Yanatile tiene su origen en el abra de Amparaes, donde se acumula el agua proveniente de las lagunas y de las lluvias persistentes y copiosas en esta parte baja de la cuenca a lo largo de todo el año. Los ríos Ocobamba y Versalles son sus principales aportantes. La cabecera de la subcuenca del río Yanatile está ubicada en una región convectiva, lo cual implica que la zona recibe precipitaciones constantes, por lo que el río se abastece de agua durante todo el año.

Finalmente, el río Urubamba se origina de la unión de los ríos Vilcanota y Yanatile. Entre sus principales afluentes del departamento de Cusco se encuentran los ríos Chirumbia, Ichiquiato, Cirialo, Comerciato, Mantalo, Yavero, Ticumpinia, Timpia, Camisea, Picha, Huipaya, Yamehua, Huitiricoya, Paquiria, Sensa y Miaria. Del departamento de Ucayali, entre sus principales afluentes se encuentran los ríos Mishahua, Sepahua, Sepa, Mapillo e Inuya.

En segundo lugar, el régimen hidrológico de la cuenca Urubamba-Vilcanota presenta una marcada variabilidad temporal de los caudales, con máximos concentrados en los meses de mayor aporte hídrico y mínimos durante el periodo de estiaje, configurando un patrón típicamente pluvial-andino. La respuesta hidrológica de la cuenca está influenciada por su

fuerte gradiente altitudinal, la presencia de aportes glaciares en la parte alta y la regulación hidráulica existente, particularmente asociada al embalse de Sibinacocha. Un estudio reciente evidencia que la operación de dicha infraestructura irrumpe con el régimen natural del río, lo que genera modificaciones en la distribución interanual de los caudales, con reducciones relativas durante la temporada húmeda y aumentos controlados en época seca en comparación con condiciones no reguladas (Drenkhan et al., 2023).

Respecto a la cantidad disponible de agua en la cuenca del río Urubamba, la ANA publicó en su portal web “Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Interregional Vilcanota Urubamba” una estimación hecha con cálculos discretos por subcuenca utilizando el método Precipitación-Escorrentía o *Soil Moisture Method* a paso mensual durante un periodo de 50 años. Se generaron 26 subcuencas para los cálculos hidrológicos y se escogieron dos estaciones para la calibración del modelo, estas fueron las estaciones hidrométricas Machu Picchu y Pisac. El modelo generó un volumen bruto de agua total de 49 537.82 hm³/año.

2.4.4 Cambio climático y variabilidad hidrológica.

Según Drenkhan et al., en su artículo “*The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru*” publicado el año 2015, los Andes peruanos están experimentando cambios significativos en su ciclo hidrológico debido a una combinación de factores hidroclimáticos y socioeconómicos. Estos cambios tienen impactos significativos en la disponibilidad del agua, su distribución y en los conflictos ya existentes sobre los recursos hídricos, los cuales terminan afectando localmente y aguas abajo a la población y a los ecosistemas.

Uno de los cambios más significativos es la contracción de los glaciares, el cual está ocurriendo a una velocidad sin precedentes en los Andes Tropicales. Estos consisten en la parte norte de las tres que conforman los Andes en el continente sudamericano, siendo las demás los Andes Secos y los Andes Húmedos. El artículo menciona que los Andes albergan la masa de

glaciares tropicales más grande del mundo, y que los glaciares se están derritiendo rápidamente debido al incremento de la temperatura y a los cambios en los regímenes de precipitación. Esto tiene implicaciones serias para la disponibilidad del agua, debido a que los glaciares constituyen el recurso hídrico de muchas comunidades de los Andes.

Se observan otros cambios significativos en los patrones de precipitación y en el aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos, por ejemplo, las inundaciones y las sequías. Estas variaciones afectan considerablemente a la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, así como a la vulnerabilidad de las comunidades a desastres relacionados con el agua.

Los factores socioeconómicos también contribuyen a los cambios en el ciclo hidrológico de los Andes peruanos. El desarrollo agroindustrial, la generación de hidroelectricidad y los cambios demográficos están afectando la disponibilidad y distribución del agua. Por ejemplo, la expansión de las actividades agroindustriales está llevando a una mayor demanda de agua para irrigación, mientras que la construcción de centrales hidroeléctricas está afectando a las descargas de los ríos y a su calidad del agua.

Años después, Drenkhan et al., en su artículo "*Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes*", publicado en 2018, proveen de nueva información sobre el impacto de la contracción de los glaciares en la dinámica hidrológica de montaña y la evolución geomorfológica, así como los riesgos y perspectivas de desarrollo de las poblaciones. Este estudio presenta un análisis multitemporal del desarrollo reciente de glaciares y lagos en la región desde 1988 hasta el 2016, una evaluación de la futura extensión de los glaciares basada en escenarios y lagos en desarrollo hasta el 2050 y el 2100, y estimaciones relacionadas del volumen de glaciares y lagos.

El estudio encontró que en la cuenca Vilcanota-Urubamba el área total de los glaciares (volumen) decreció en un 37.3% (20.5%), de 226.1 km² (8.122 km³) en 1988 a 141.7 km² (6.457 km³) en 2016. Además, los lagos adyacentes en la cuenca aumentaron en área (número)

en 15.5% (18.3%), de 23.3 km² (460 lagos) en 1988 a 26.9 km² (544 lagos) en 2016 (Drenkhan et al., 2018). Por lo tanto, el volumen de los lagos ha aumentado en un 9.7%, de 0.637 km³ a 0.699 km³, respectivamente.

Por otra parte, Drenkhan et al. (2018) señalan que en la cuenca la variabilidad espaciotemporal del desarrollo de glaciares y lagos es complejo y no uniforme. Identificaron diferentes tasas de contracción de los glaciares en cuatro cadenas montañosas diferentes, así como secados temporales de lagos. El estudio señala, además, que dicha variabilidad espaciotemporal no puede ser totalmente atribuida a impactos directos de eventos causados por el fenómeno El Niño, y que se necesita de más estudios en base a datos más detallados para comprender y posiblemente confirmar efectos climáticos y morfológicos locales en los posibles cambios a mediano y largo plazo en las tendencias de la contracción de los glaciares. Cabe precisar que estos resultados no fueron utilizados directamente en los cálculos del presente trabajo, sino que se incorporan como referencia contextual para ampliar el conocimiento sobre la dinámica hidrológica y glaciar de la cuenca.

La actual contracción de los glaciares en la cuenca tiene implicaciones significativas para la población local y los ecosistemas cercanos. Los glaciares representan una reserva de agua fundamental para la región, por lo que su desaparición afectaría gravemente a la biodiversidad y a la economía de las comunidades locales. El estudio insiste en que es urgente aplicar medidas de adaptación y mitigación que reduzcan los efectos negativos del retroceso de los glaciares.

Finalmente, Drenkhan et al. (2018) proveen información sobre el posible desarrollo de los glaciares y lagos en el futuro. Las proyecciones basadas en escenarios sugieren que el área y volumen total de los glaciares en la región continuará disminuyendo, siendo la Cordillera Urubamba la primera en perder su cubierta glaciar. Asimismo, sugieren que el número y área de los lagos continuarán incrementándose, junto al potencial secado temporal de algunos de estos.

Capítulo 3 Materiales y Metodología

3.1 Materiales

3.1.1 Geografía y red hidrográfica.

El estudio comprende el área de la cuenca del río Vilcanota, que comprende 7 031.12 km². Para delimitar la cuenca se hizo uso de cinco imágenes satelitales proporcionadas por la plataforma *EarthExplorer*, administrada por el USGS (*United States Geological Survey*), las cuales tienen una resolución de 30 m. Por otro lado, se descargó la red hidrográfica de todo el Perú del sitio web GEO GPS PERÚ y se cortó con respecto a la superficie que abarca la cuenca.

3.1.2 Data climatológica e hidrológica.

Esta data consistió en la precipitación total, la temperatura máxima, mínima y media y el caudal promedio mensualizados. La información comprendió el periodo entre los años 1964 y 2022. Se contaron con 12 estaciones para la precipitación, 9 para la temperatura y 1 para el caudal promedio. Todas las estaciones fueron convencionales. Dicha información fue proporcionada por el SENAMHI con el propósito de desarrollar el presente trabajo. En el Capítulo 4 se detalla la cantidad de información disponible para cada variable.

3.1.3 Programas de cómputo utilizados.

Se utilizaron distintos programas para cada etapa del presente trabajo. El software ArcMap versión 10.5 se utilizó para el procesamiento de los datos geográficos. En el tratamiento de la información se utilizaron el software libre Hydrognomon 4 y el software Microsoft Excel para realizar el análisis de consistencia y la completación y extensión de datos, y para el cálculo de los valores medios en la cuenca se utilizó el software Hydraccess. Finalmente, en la aplicación de los modelos, se utilizó la hoja de cálculo desarrollada por el INRAE de Francia (*National Research Institute for Agriculture, Food and the Environment*) para el modelo GR2M y el software HidroCALC 2.0.2, para los modelos Lutz-Scholz y Témez.

3.2 Metodología

3.2.1 Análisis de consistencia de la información.

El objetivo de preprocesar la información hidrológica es asegurar que los datos provenientes de esta sean confiables y representen adecuadamente las condiciones hidrológicas reales de la cuenca o sistema hidrológico. Este tipo de análisis suele aplicarse en estudios, modelaciones o, en general, en la toma de decisiones. Para que los resultados sean válidos, las series de datos deben ser homogéneas y consistentes, evitando errores aleatorios o sistemáticos que suelen afectar las mediciones. Al final, la calidad de cualquier modelo hidrológico estará condicionada por la calidad de los datos que se utilicen como entrada.

El análisis de consistencia de la información se realizó para las variables de precipitación, temperatura máxima, mínima y media. Según Montealegre (1990), en la hidrología, casi todas las técnicas de corrección están basadas en la comparación de los datos de una estación (de cualquier tipo) con los de otras estaciones próximas, las cuales deben estar situadas en un clima similar y ofrecer información homogénea. Asimismo, Villón (2007) establece que la evaluación de la consistencia en los registros hidrológicos se lleva a cabo a través de tres etapas fundamentales: análisis visual gráfico, análisis de doble masa y análisis estadístico.

El análisis visual gráfico se basa en la representación de los datos hidrológicos históricos en coordenadas cartesianas, donde el eje de las abscisas se utiliza para el tiempo (ya sea en escala diaria, mensual o anual), mientras que el eje de las ordenadas refleja los valores registrados de la serie. Mediante este gráfico se puede(n) indicar el o los periodos donde la información es dudosa, lo cual se puede reflejar como “picos” muy altos o valores muy bajos, saltos y/o tendencias, que deberán comprobarse si se tratan de fenómenos naturales que realmente ocurrieron o de errores sistemáticos. Finalmente, Villón indica que los juicios emitidos a partir del análisis visual deben complementarse con el análisis de doble masa.

Por otro lado, Montealegre (1990) menciona al Método de doble masa como uno de los más efectivos en la corrección de datos. Este método evalúa la consistencia de una serie en la estación X tomando como referencia los datos de una estación cercana Y. Al graficar ambas series en un sistema de ejes cartesianos, es posible identificar cambios en la pendiente que no tienen un origen meteorológico, sino técnico o instrumental (Montealegre, 1990). Según el autor, cuando se detectan estas variaciones, la homogeneidad debe recuperarse ajustando los datos al tramo más confiable (usualmente el inicial) mediante el cálculo de la relación entre las pendientes de los segmentos de la curva.

Para esta sección, se siguió la metodología sugerida por Villón en su libro “Hidrología Estadística”, publicado en el 2007. Según el autor, el análisis gráfico visual y el Método de doble masa son útiles en una primera etapa visual para identificar el posible periodo por corregir y el posible periodo confiable. Luego, se procedió con el análisis estadístico, compuesto por el análisis de saltos y el análisis de tendencias. En el análisis de saltos, hay que aplicar la prueba t (de Student), para evaluar la consistencia de la media, y la prueba F (de Fisher), para evaluar la consistencia de la desviación estándar, en cada muestra. Si alguna de las pruebas confirma que la muestra no es consistente, se procede a corregir el periodo dudoso mediante una regresión lineal, basada en la muestra confiable. Este proceso se ejecutó mediante el software Microsoft Excel, usando la opción “Análisis de datos”.

Finalmente, el análisis de tendencias requiere primero realizar el análisis de la tendencia en la media, en el cual se calcula el estadístico $|t_c|$ y se compara con el valor de t_t , que se obtiene de la tabla de t de Student, con 95% de probabilidad. Si $|t_c|$ es mayor que t_t , la tendencia es significativa y debe corregirse, de tal forma que se preserve una media constante. Luego, se procede con el análisis de la tendencia en la desviación estándar, mediante el cual se determina, de forma similar, si las series deben corregirse o no.

3.2.2 Completación y extensión de la información.

Como se mencionó previamente, uno de los objetivos consistió en completar y extender la información hidrometeorológica correspondiente al periodo 1964–2022. Se empleó el método de generación de números aleatorios para el relleno y extensión de datos, asumiendo una distribución normal para cada variable y estación. El procedimiento se realizó estación por estación, calculando previamente la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la información observada disponible. Posteriormente, los valores faltantes fueron generados aleatoriamente a partir de una distribución normal parametrizada con dichos estadísticos ($N(\mu, \sigma)$). Este método permitió conservar las características estadísticas básicas de cada serie.

Con el fin de evaluar que la completación no alterara significativamente el comportamiento estadístico de los datos originales, se realizó una comparación entre la serie original incompleta y la final completada mediante el cálculo de la media, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación. La completación fue considerada aceptable cuando la media de la serie extendida presentó valores similares a los originales y cuando los estadísticos de dispersión no mostraron ningún incremento respecto a la serie base, lo que indica que la estructura estadística general se mantuvo estable.

No obstante, debe señalarse que el método empleado es de carácter estocástico y, por tanto, introduce un grado de incertidumbre inherente a la generación aleatoria de valores. Si bien se preservan las propiedades estadísticas globales, la técnica no garantiza la reproducción exacta de la variabilidad temporal ni de eventos extremos, por lo que los resultados deben interpretarse considerando esta limitación metodológica. Finalmente, en la siguiente figura se resumen los procesos detallados anteriormente.

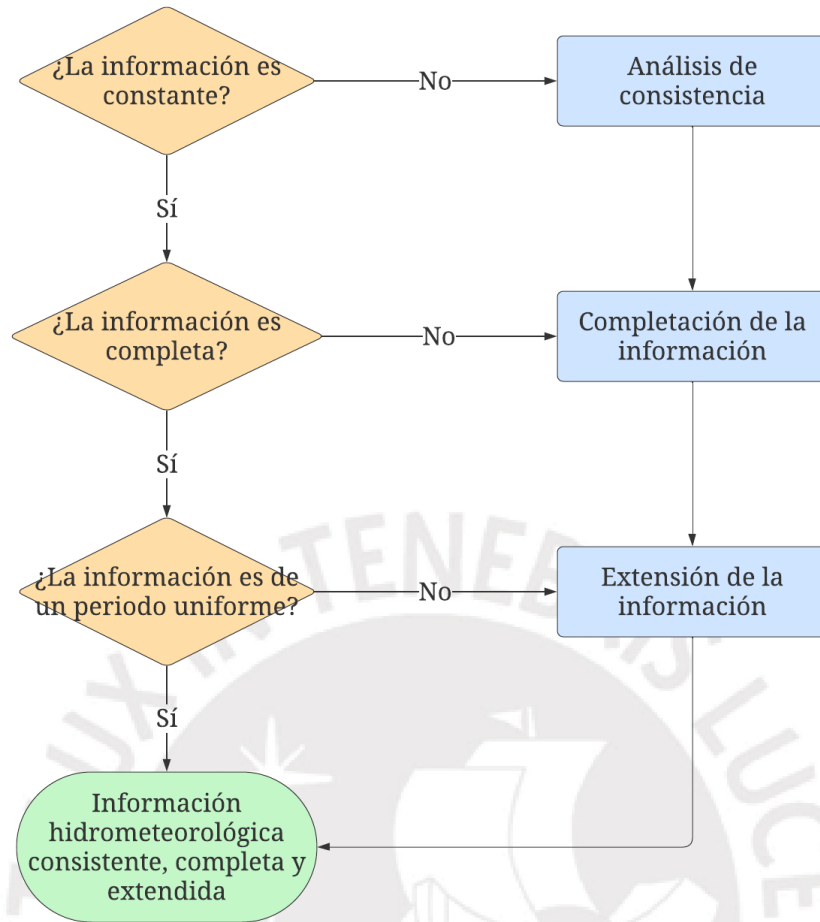


Figura 3.1 Esquema para la validación de la información

3.2.3 Cálculo de la evapotranspiración potencial.

La ETP se calculó en base a la precipitación total y las temperaturas máxima, mínima y media haciendo uso del método de Hargreaves y Samani (1985). Su ecuación se basa en la temperatura máxima, mínima, media y la radiación solar, la cual depende de la latitud del lugar y del mes en el cual se esté haciendo el cálculo. La razón de su elección radica en que este método es recomendado cuando la data meteorológica disponible es escasa (Lujano et al, 2023); además de su capacidad de abarcar las condiciones de alta montaña y alta radiación solar propias de esta región del país. La ecuación de Hargreaves y Samani es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0023 * (t_{med} + 17.78) * R_0 * (t_{máx} - t_{mín})^{0.5} \quad (3.1)$$

Donde t_{med} , $t_{m\acute{a}x}$ y $t_{m\acute{i}n}$ son las temperaturas media, máxima y mínima, y R_0 es la radiación solar extraterrestre, definida como la radiación que incide el límite superior de la atmósfera terrestre y se obtiene de tablas (Allen et al, 1998).

3.2.4 Cálculo de los valores medios para la cuenca.

Una vez creadas las series meteorológicas desde el año 1964 hasta el 2022, el software libre Hydraccess se utilizó para obtener los valores medios de estas en toda la cuenca, más específicamente, de la precipitación total y de la evapotranspiración potencial. El software ofrece el cálculo de estos valores mediante cuatro procedimientos: media aritmética, polígonos de Thiessen, inverso de la distancia y Kriging. Estos dos últimos toman en cuenta la influencia de distribución espacial de los fenómenos climáticos y realizan interpolaciones lineales dentro de toda la cuenca. El método utilizado para el presente trabajo fue el de Kriging, técnica ampliamente utilizada en la interpolación espacial y la estimación de valores desconocidos en ubicaciones no muestreadas. Estudios han demostrado que el método es adecuado para estimar superficies areales de variables hidrológicas al minimizar el error de predicción y permitir una representación espacial más precisa que métodos determinísticos tradicionales (Ly et al, 2013).

3.2.5 Definion de los periodos de calibración y de validación.

Para definir dichos periodos se tomó en cuenta la continuidad de información sobre caudales disponible. Debido a que se contaba con cuatro grupos separados de información casi continua, se decidió que dos de estos grupos se utilizarán como periodos de calibración, mientras que los otros dos se utilizarán como periodos de validación. Los parámetros obtenidos en un periodo de calibración serán evaluados en los dos periodos de validación. Estos grupos fueron los correspondientes a los años 1964-1980 y 1987-1994, para la calibración, y 1999-2005 y 2009-2022 para la validación.

3.2.6 Aplicación de los modelos hidrológicos.

3.2.6.1 modelo GR2M.

Para este modelo se usaron los datos de precipitación, la evapotranspiración potencial y el área total de la cuenca. Primero, se procedió con la etapa de calibración. Se ajustaron los parámetros iniciales de almacenamiento del Reservorio Suelo, S_0 , y almacenamiento del Reservorio de Agua Gravitacional, R_0 . Luego, se empleó la técnica de mínimos cuadrados asegurando que el modelo replicara con la mayor fidelidad posible la dinámica de los caudales históricos, tomando como objetivo la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, *Nash-Sutcliffe Efficiency*), la cual debía alcanzar el valor máximo, cambiando los parámetros X_1 y X_2 . Los valores del NSE se interpretaron según la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe

Evaluación del Desempeño	NSE
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.5 < NSE < 0.65$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$

Nota. Tomada de “*River flow forecasting through conceptual models Part 1—A discussion of principles*”, de Nash y Sutcliffe, 1970.

En la etapa de validación, fueron utilizados los parámetros óptimos obtenidos de la calibración, tomando como insumos a los conjuntos de datos separados para esta etapa. Si el NSE obtenido lograba ser satisfactorio en ambas etapas, se consideraría al modelo como confiable y se calcularían tres métricas más para medir la calidad de los valores calculados en comparación a los observados: el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), el Error Cuadrático Medio (RMSE, *Root Mean Square Error*) y el Coeficiente de Determinación (R^2).

3.2.6.2 modelo Lutz-Scholz.

Primero, se calculó el coeficiente de escurrimiento según la Ecuación (2.14) y el déficit de escurrimiento mediante la Ecuación (2.15). La precipitación efectiva se calculó según la Ecuación (2.16). Por otro lado, el valor de la retención anual se asumió en base a los valores

propuestos por el método según las características de retención de la cuenca. Luego, el coeficiente de agotamiento se calculó según la Ecuación (2.23). La relación de caudales b_0 se calculó según la Ecuación (2.20). El gasto de la retención para los meses de la estación seca se estimó según la Ecuación (2.19). El abastecimiento de la retención para los meses de la estación lluviosa se estimó según los porcentajes de la Tabla 2.2. El abastecimiento de la retención se calculó según la Ecuación (2.25). El caudal fue calculado con la Ecuación (2.26). A diferencia del modelo GR2M, cuyos parámetros pueden calibrarse mediante procedimientos de optimización automática incorporados en su hoja de cálculo, el modelo Lutz-Scholz no contempla un esquema formal de optimización matemática. Sus parámetros se ajustan mediante criterios hidrológicos y procedimientos iterativos, por lo que no se aplicaron técnicas de minimización del error para su estimación. Finalmente, se calculó el NSE en las etapas de calibración y validación.

3.2.6.3 modelo Témez.

Para determinar la contribución superficial, primero, el exceso en el acuífero se estimó con la Ecuación (2.27) o (2.28). Luego, la humedad del suelo se calculó según la Ecuación (2.31). La infiltración se calculó con la Ecuación (2.33). De esta manera, se obtuvo la contribución superficial con la Ecuación (2.34). Por otra parte, para hallar la contribución subterránea, primero se calculó el volumen acumulado en el acuífero según la Ecuación (2.36). De esta manera, se obtuvo la contribución con la Ecuación (2.38). El flujo total se obtuvo de la suma de ambas contribuciones, según la Ecuación (2.39). Como se mencionó anteriormente, los parámetros a calibrar consistieron en $H_{\text{máx}}$, C , $I_{\text{máx}}$ y α . Como el modelo Lutz-Scholz, este modelo no contempla un esquema formal de optimización matemática. Se evaluó la calidad del ajuste mediante el NSE y se determinó el modelo hidrológico más representativo.

3.2.7 Elaboración de los caudales medios mensuales.

Para ello se calcularon los promedios mensuales históricos de la precipitación total y la evapotranspiración potencial. Dicha información se introdujo en el modelo elegido, utilizando la configuración de parámetros obtenida previamente en las etapas de calibración y validación.

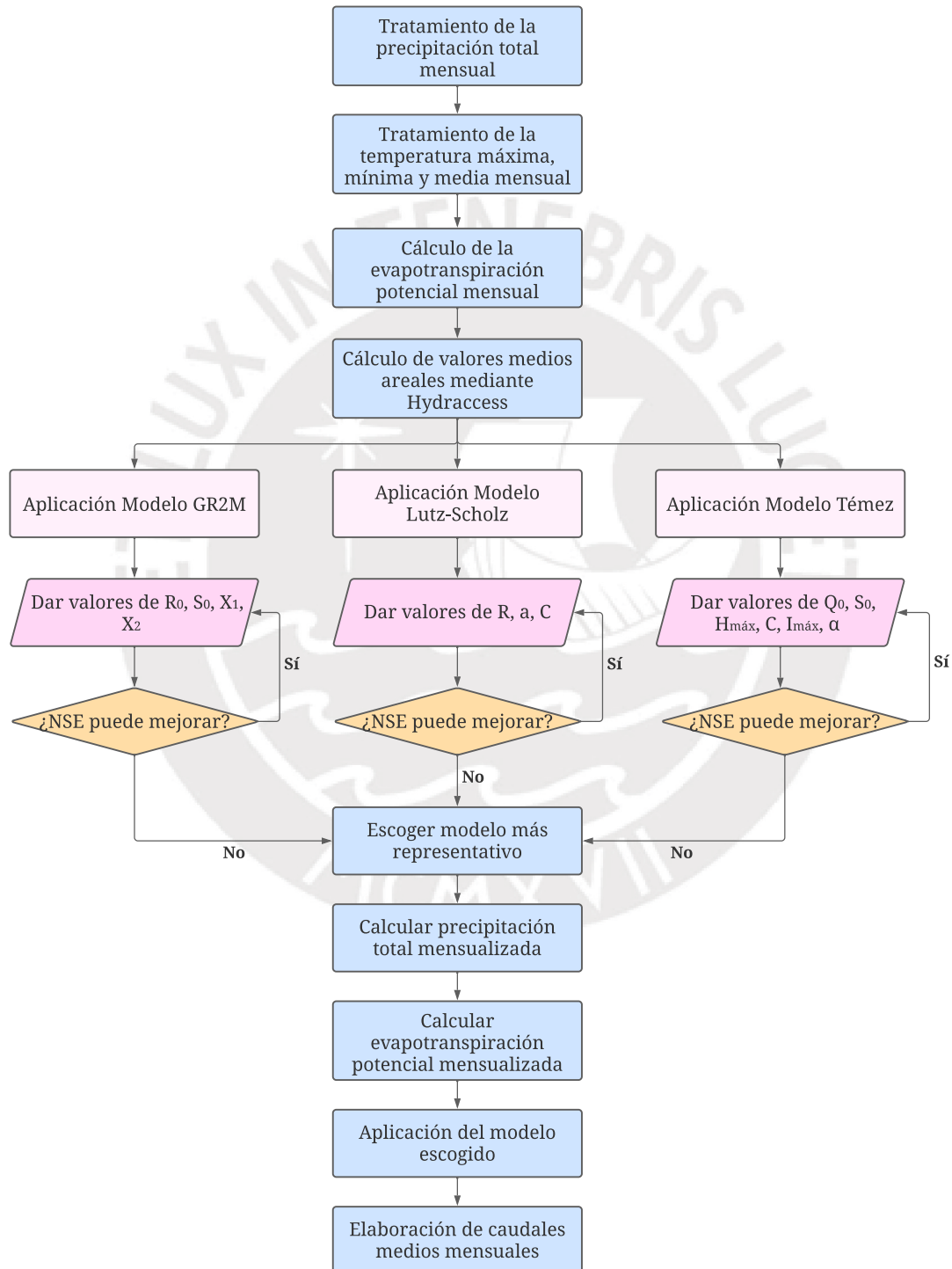


Figura 3.2 Diagrama de flujo para la modelación hidrológica

Capítulo 4 Tratamiento de Información

4.1 Precipitación Total Mensual

4.1.1 Descripción de la información pluviométrica.

En primer lugar, se obtuvieron los registros de precipitación provenientes de doce estaciones hidrometeorológicas, dentro y fuera del área de estudio. Todas las estaciones contaban con, por lo menos, veinticinco años de registro de información, por lo que no se descartó ninguna del análisis hidrológico; como lo sugiere el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.

La Tabla 4.1 muestra los nombres de las estaciones, su ubicación y la longitud de registro histórico de cada una (donde se obvian las lagunas de información). Se definió el periodo Enero 1964 – Diciembre 2022 para el posterior tratamiento de la información. Así, la Tabla 4.2 muestra la cantidad de años con al menos un dato mensual, los años completos y su correspondiente porcentaje con respecto a los 59 años por completar. La Figura 4.1 muestra un mapa con la ubicación espacial de las estaciones; además, la Figura 4.2 contiene un gráfico que ilustra la continuidad de la información.

Tabla 4.1 Datos generales de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas

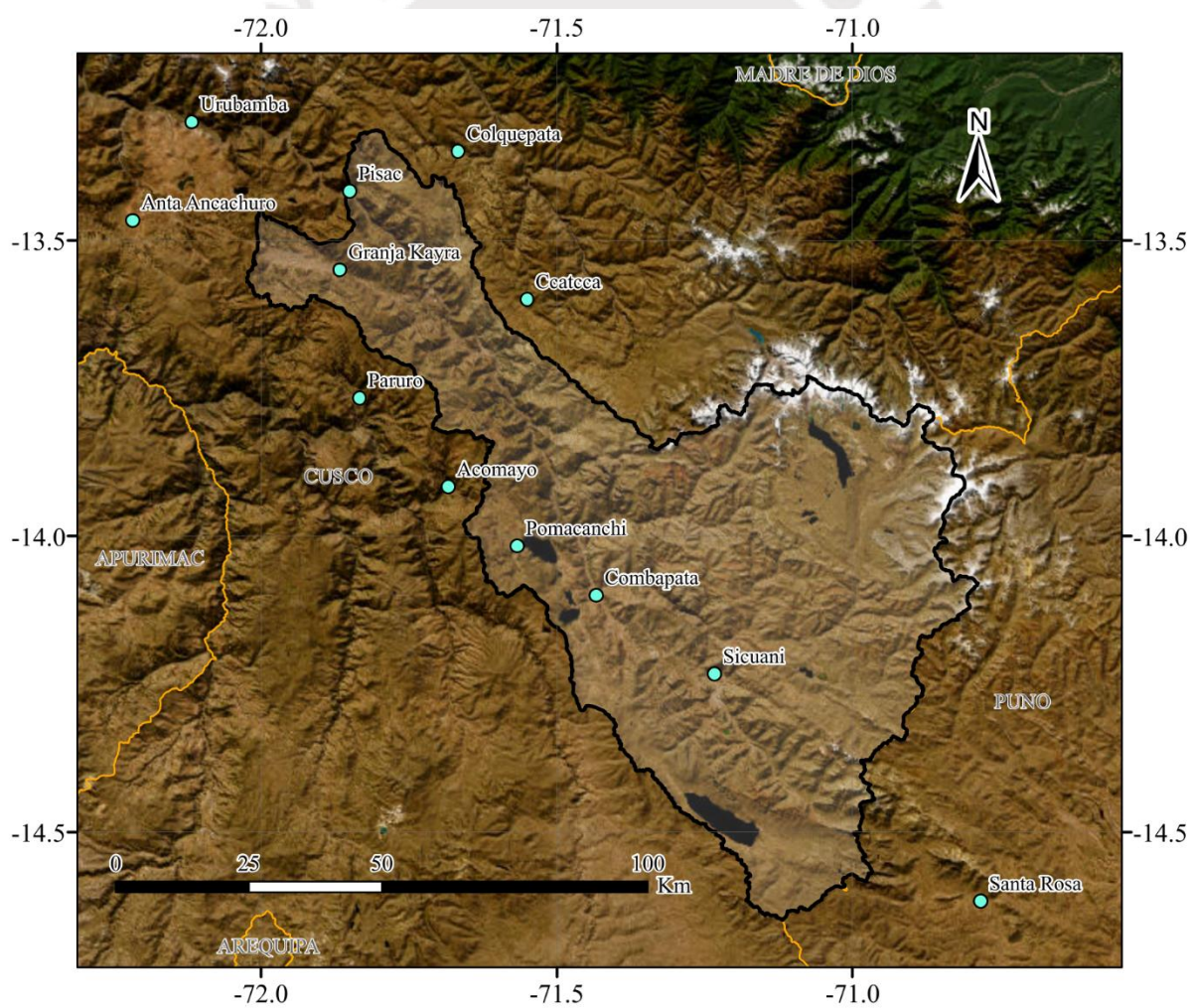
Estación	Código	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)	Longitud de registro
Acomayo	000687	71° 41' "W"	13° 55' "S"	3212	Dic 1963 – Ago 2021
Anta Ancachuro	000684	72° 13' "W"	13° 28' "S"	3324	Jun 1964 – Dic 2022
Ccatcca	000690	71° 33' "W"	13° 36' "S"	3681	Ene 1990 – Dic 2022
Colquepata	156306	71° 40' "W"	13° 21' "S"	3696	Mar 1964 – Dic 2022
Combapata	000756	71° 26' "W"	14° 6' "S"	3464	Feb 1964 – Jun 1997
Granja Kayra	000607	71° 52' "W"	13° 33' "S"	3214	Mar 1964 – Nov 2022
Paruro	000686	71° 50' "W"	13° 46' "S"	3070	Ene 1964 – Dic 2022
Pisac	000844	71° 51' "W"	13° 25' "S"	2990	Dic 1963 – Dic 2022
Pomacanchi	000812	71° 34' "W"	14° 1' "S"	3690	Feb 1985 – Dic 2022
Sicuaní	000759	71° 14' "W"	14° 14' "S"	3534	Ene 1962 – Jul 2022
Santa Rosa	000823	70° 47' "W"	14° 37' "S"	3957	Dic 1960 – Dic 2022
Urubamba	000683	72° 7' "W"	13° 18' "S"	2850	Dic 1963 – Dic 2022

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Tabla 4.2 Estaciones hidrometeorológicas escogidas para el estudio

Estación	Años totales	Años completos	% Información disponible
Acomayo	48	29	49.2%
Anta Ancachuro	49	36	61.0%
Ceatcca	33	25	42.4%
Colquepata	45	36	61.0%
Combapata	32	24	40.7%
Granja Kayra	59	44	74.6%
Paruro	51	36	61.0%
Pisac	59	39	66.1%
Pomacanchi	36	20	33.9%
Sicuani	51	29	49.2%
Santa Rosa	51	33	55.9%
Urubamba	55	34	57.6%

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

**Figura 4.1** Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas

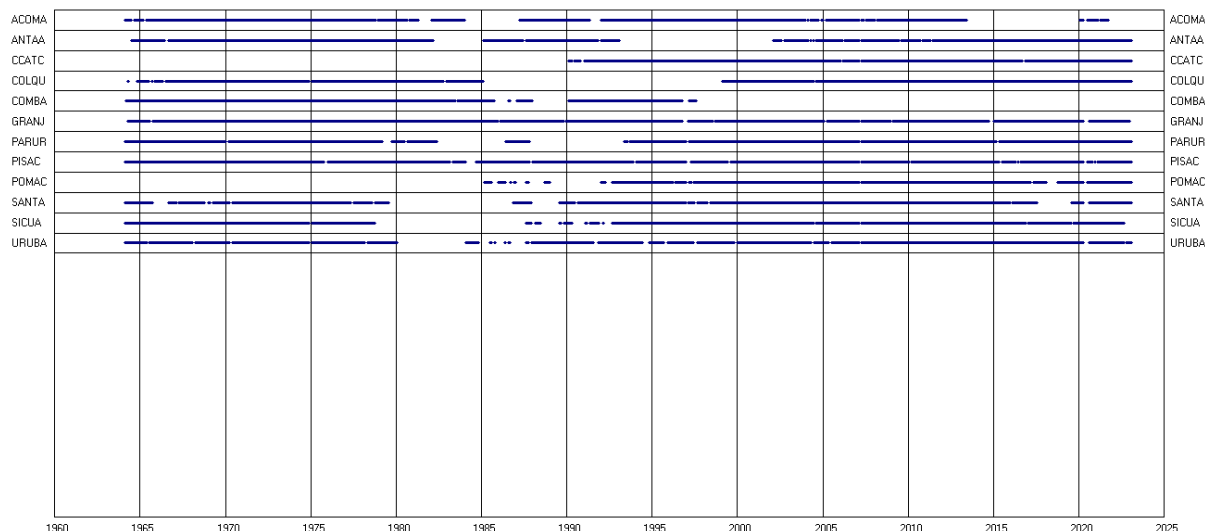


Figura 4.2 Gráfico de continuidad de la información

A continuación, se describe el proceso del análisis de consistencia de la información, constituido por tres subprocesos: análisis visual gráfico, análisis de doble masa y análisis estadístico.

4.1.2 Análisis de consistencia.

4.1.2.1 análisis visual gráfico.

Mediante el ploteo de las series de tiempo mensuales, se hizo una inspección visual para afirmar, anticipadamente, que la información es consistente, o, en el otro caso, que existe(n) período(s) donde la información es dudosa. Estos análisis previos deben ser contrastados con los análisis numéricos, posteriormente. A continuación, se incluyen observaciones acerca de las características de las series de tiempo.

La información pluviométrica de la estación Acomayo demuestra homogeneidad a lo largo de todo su registro, a excepción de un gran salto ocurrido en Noviembre del año 1987, en el cual se registró un valor de 553.3 mm. Ver Figura 4.3.

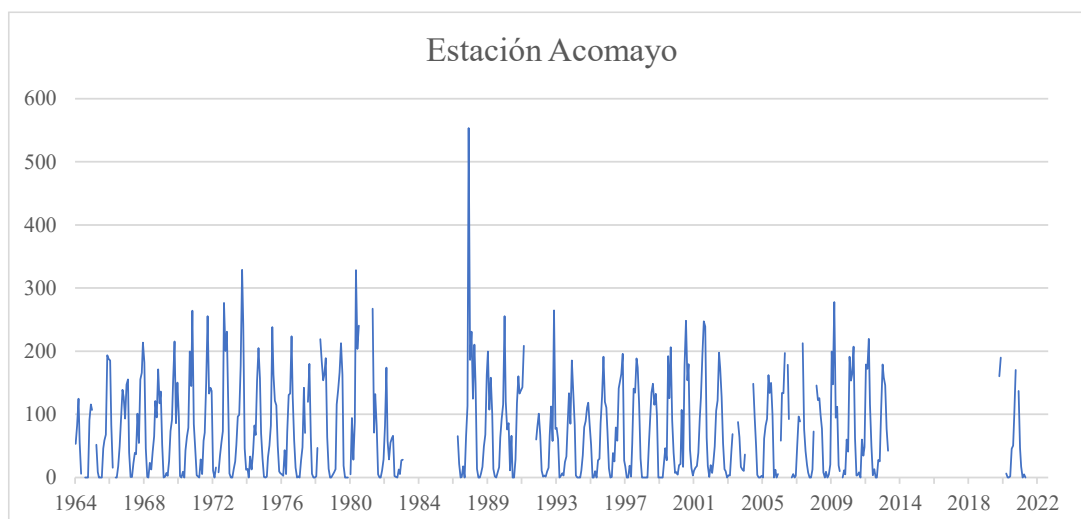


Figura 4.3 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Acomayo

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Anta Ancachuro demuestran homogeneidad en todo su registro, aunque existen algunos saltos en el periodo 1994-2014, más específicamente en los años 2002, 2009 y 2010, donde la precipitación total mensual alcanzó valores máximos de 296.7, 288.7 y 289 mm, respectivamente. Ver Figura 4.4.

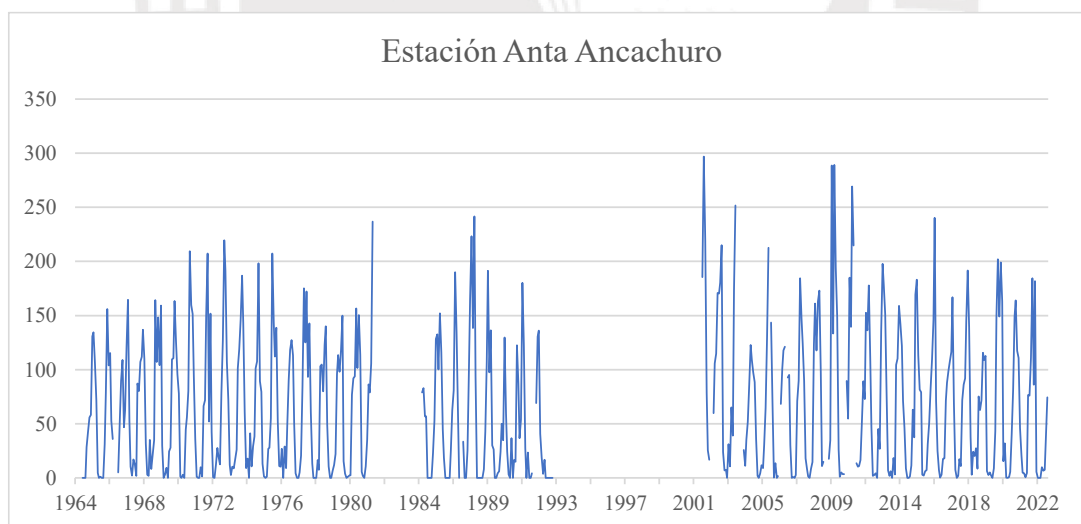


Figura 4.4 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Anta Ancachuro

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Ccatcca demuestran una aparente falta de homogeneidad entre los periodos 1990-2003 y 2004-2022, donde la media podría ser

considerablemente diferente entre estos periodos. Además, existe un salto en Enero de 2001, donde fue registrado un valor de 265.3 mm. Ver Figura 4.5.

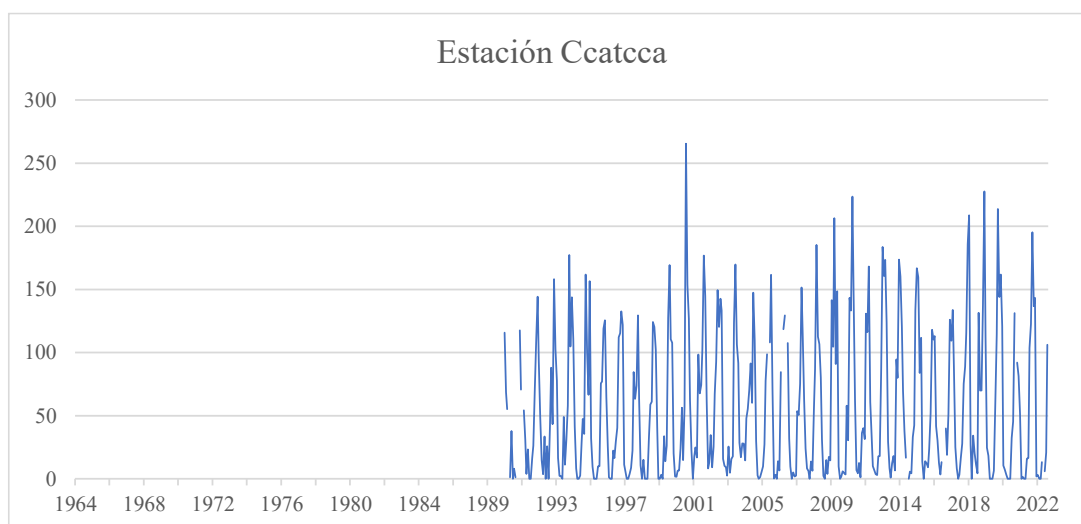


Figura 4.5 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Ccatcca

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Colquepata demuestran homogeneidad, aunque existe un gran salto en el que se registró un valor de 481.4 mm, ocurrido en el mes de Enero de 1984. Ver Figura 4.6.

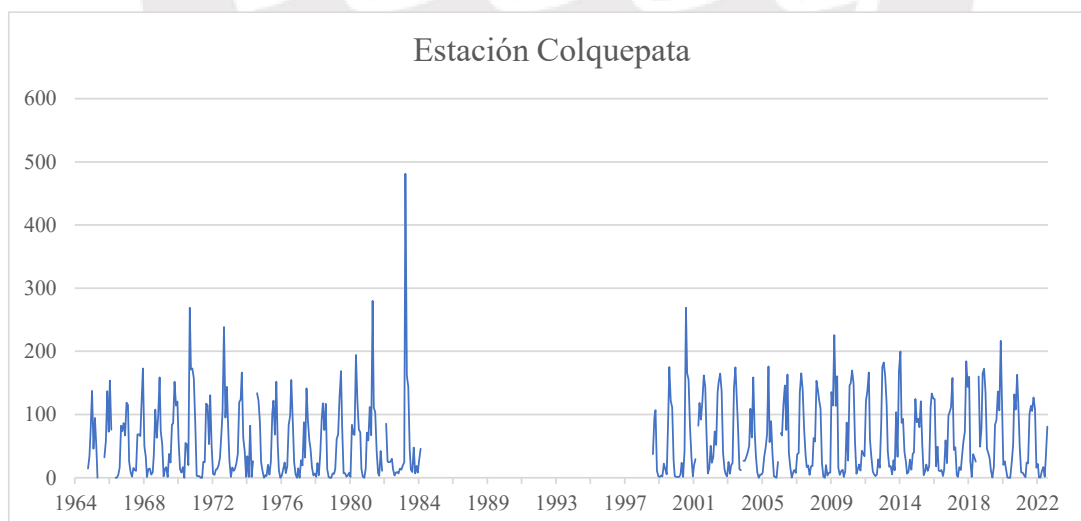


Figura 4.6 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Colquepata

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Combapata demuestran ser homogéneos, además, no presentan picos pronunciados. Ver Figura 4.7.

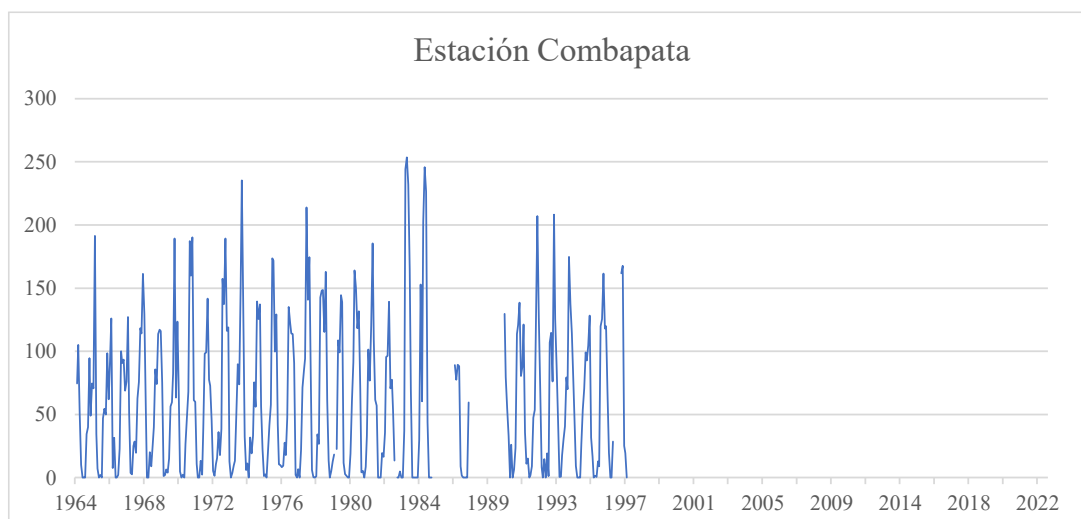


Figura 4.7 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Combapata

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Granja Kayra demuestran ser homogéneos, además, no presentan picos pronunciados. Solo se nota la presencia de un salto no muy pronunciado, ocurrido en el mes de enero de 2010, en el que se registró 268.5 mm. Ver Figura 4.8.

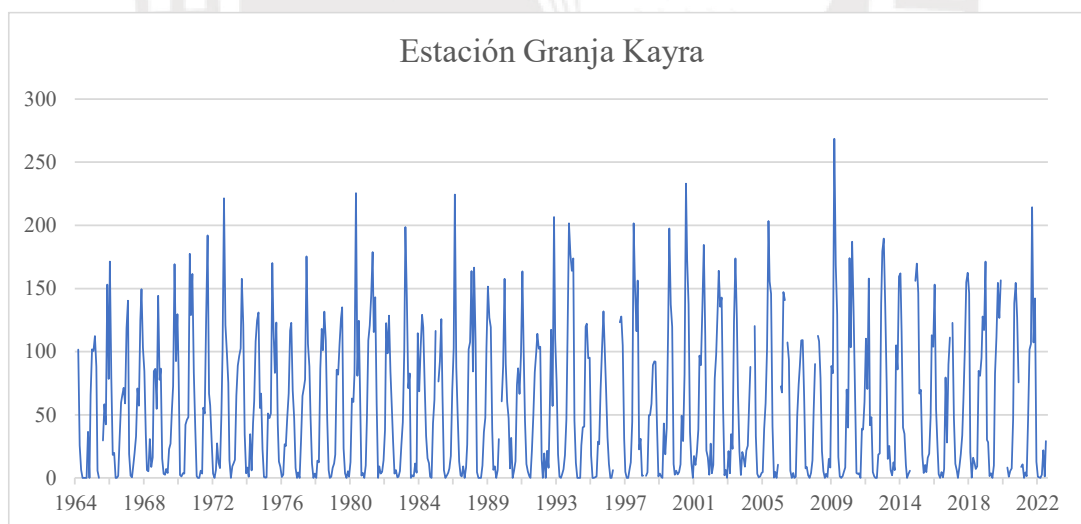


Figura 4.8 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Granja Kayra

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Paruro demuestran ser homogéneos, aunque entre los años 1964 y 1974 ocurren varios saltos que superan los 400 mm, más específicamente en los años 1967, 1968 y 1969. Ver Figura 4.9.

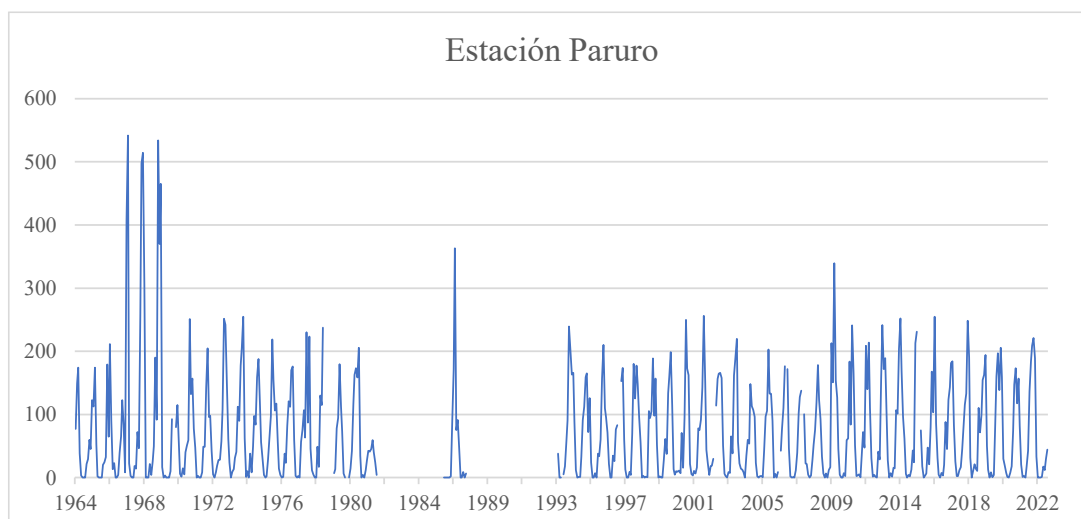


Figura 4.9 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Paruro

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Pisac parecen no ser homogéneos, debido a que se observa una ligera discrepancia entre la media de los periodos 1964-1988 y 1989-2022. Por otro lado, se observa un gran salto de 402.3 mm, ocurrido en el mes de Marzo de 1970. Ver Figura 4.10.

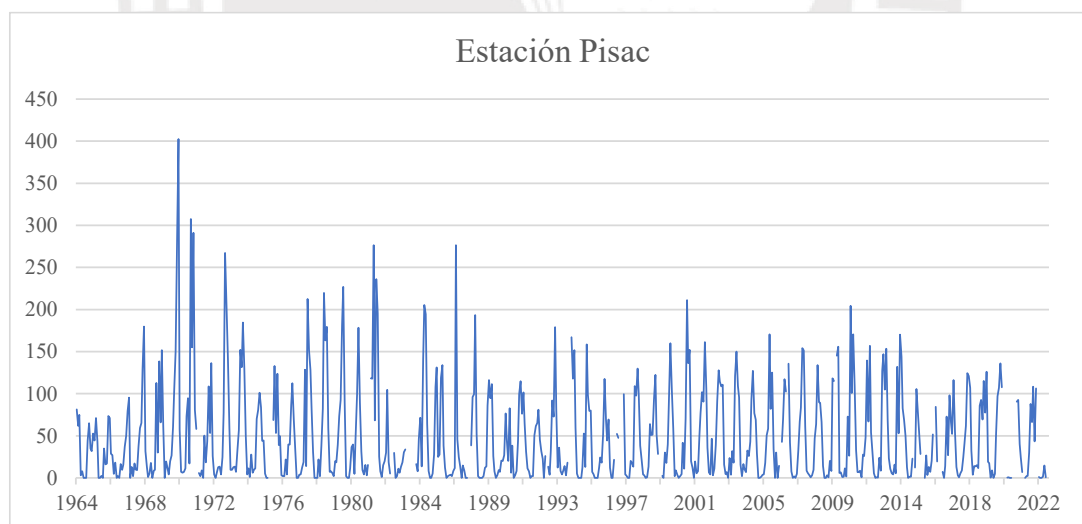


Figura 4.10 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Pisac

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Pomacanchi demuestran ser homogéneos, sin la presencia de saltos pronunciados. Ver Figura 4.11.

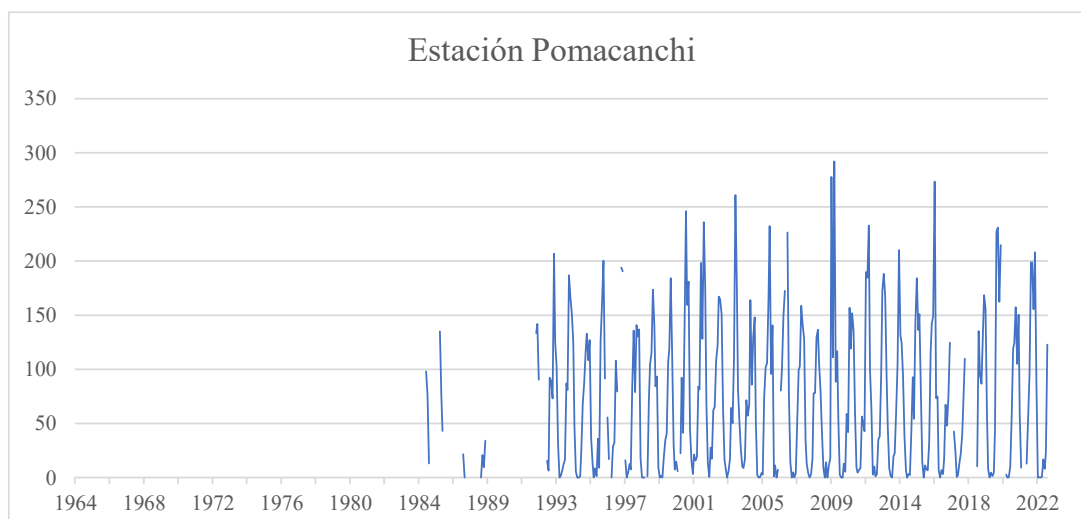


Figura 4.11 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Pomacanchi

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Santa Rosa parecen no ser homogéneos, debido a que a partir del año 1984 la media de los valores parece ser algo menor que en el anterior periodo. Además, se observan dos saltos ocurridos entre Diciembre de 1970 y Enero de 1972, en los cuales se registraron valores de 331.7 y 309.9 mm, respectivamente. Ver Figura 4.12.

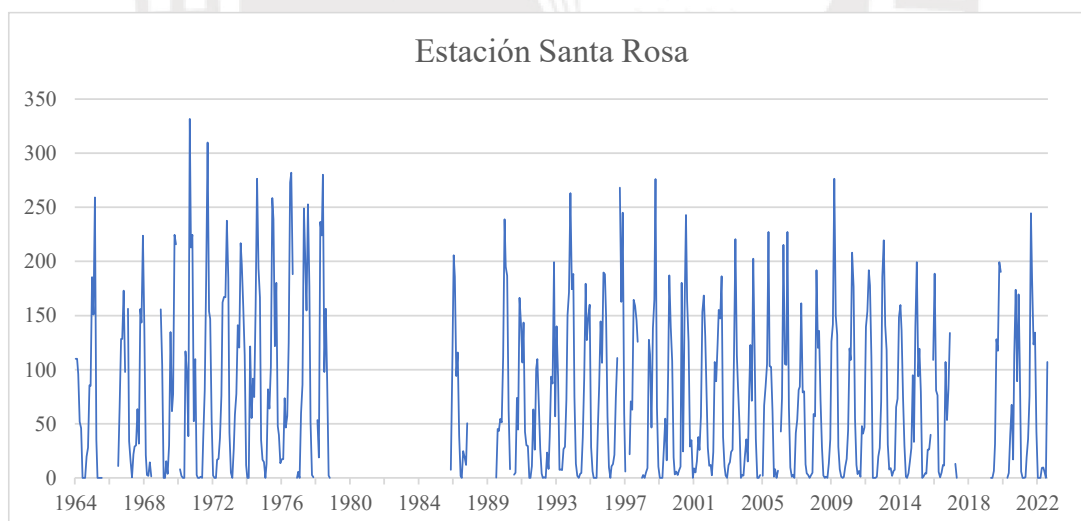


Figura 4.12 Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Santa Rosa

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

La información pluviométrica de la estación Sicuani demuestra ser homogénea en todo su registro histórico, sin embargo, pueden observarse dos saltos ocurridos en los meses de Abril

de 1968 y Febrero de 2016, con valores de 272.9 y 259.5 mm, respectivamente. Ver Figura 4.13.

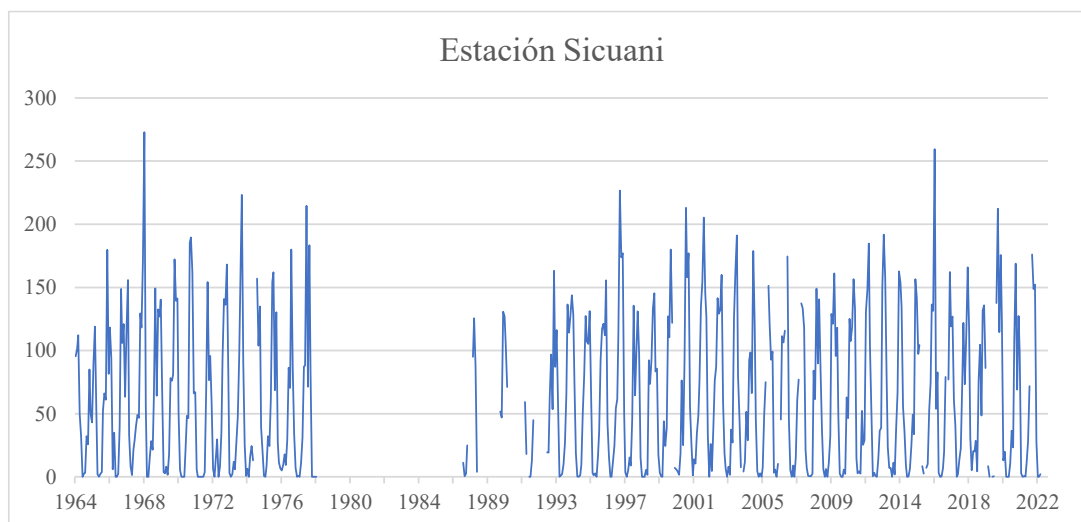


Figura 4.13 *Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Sicuani*

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos pluviométricos de la estación Urubamba demuestran ser homogéneos en todo su registro, sin embargo, se observa un solo salto de 188.2 mm, registrado en Enero de 2010. Ver Figura 4.14.

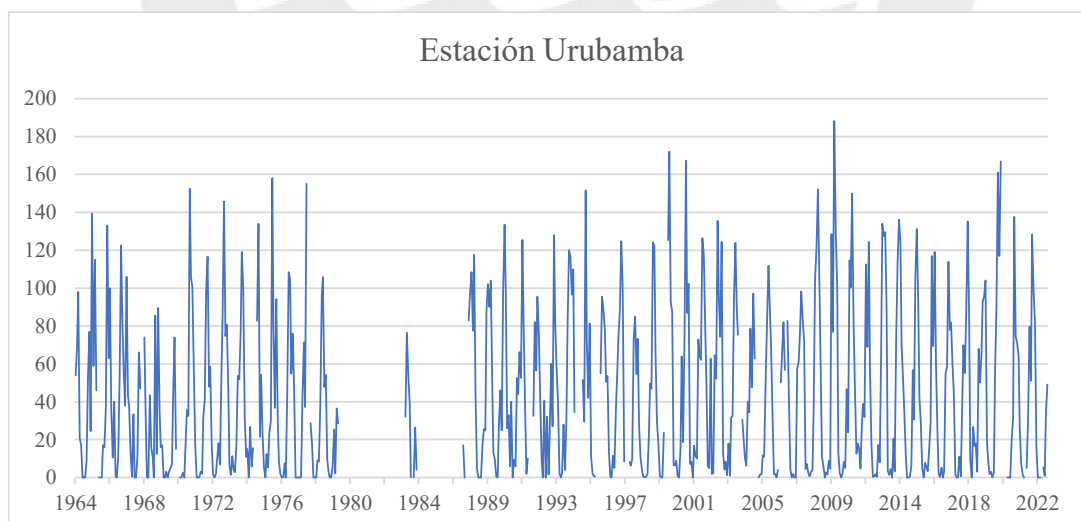


Figura 4.14 *Serie histórica de Precipitación Total Mensual (mm) – Estación Urubamba*

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

4.1.2.2 análisis de doble masa.

La siguiente figura muestra el diagrama de doble masa de cada una de las doce estaciones, agrupadas en tres grupos según sus altitudes. Para este análisis, se definieron las abscisas como los valores acumulados del promedio de las precipitaciones totales mensuales de todas las estaciones del grupo, mientras que las ordenadas representaron el acumulado mensual de cada estación individual. Con el fin de garantizar la coherencia estadística, se procesaron únicamente los periodos de registro comunes a las cuatro estaciones de cada agrupación. A través de estas representaciones, fue posible determinar la estación más robusta y confiable, basándose en la ausencia o mínima presencia de discontinuidades y cambios de pendiente en la serie. Finalmente, la estación Granja Kayra fue seleccionada como la más confiable.

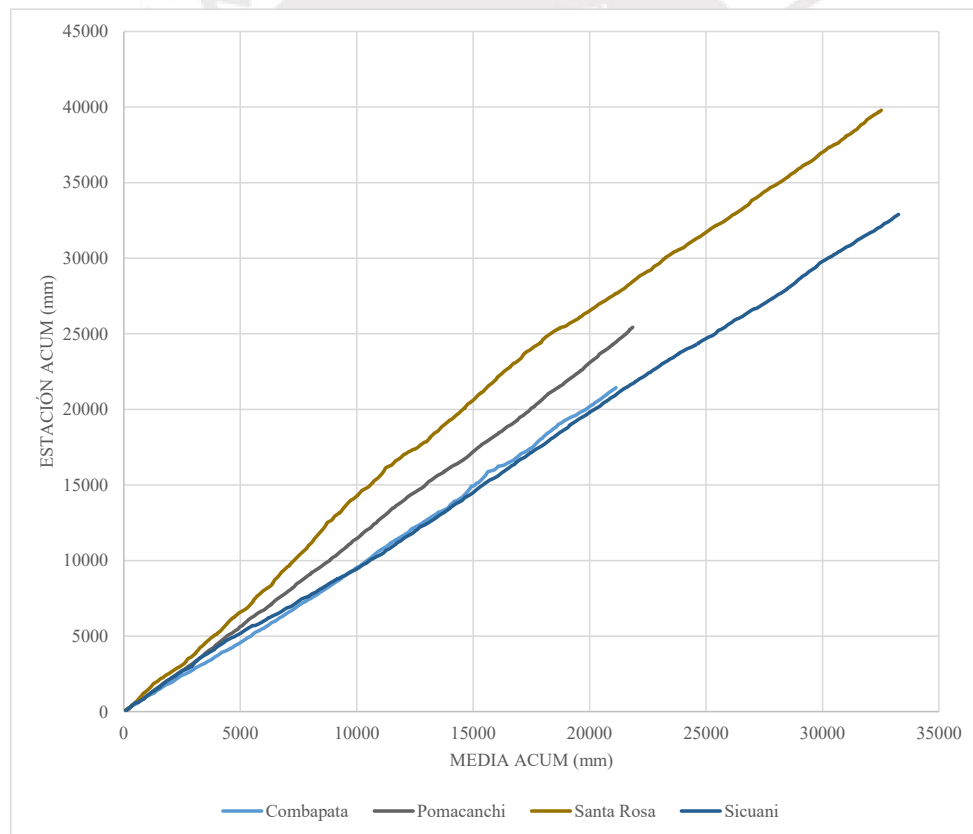


Figura 4.15 Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 1

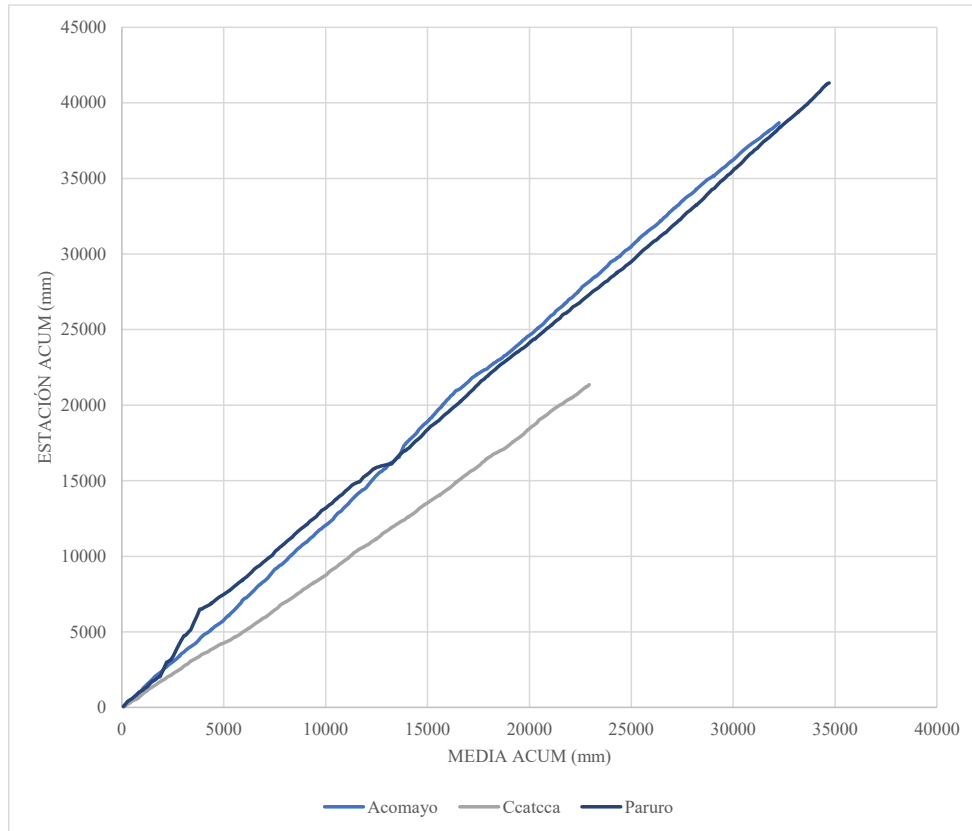


Figura 4.16 Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 2

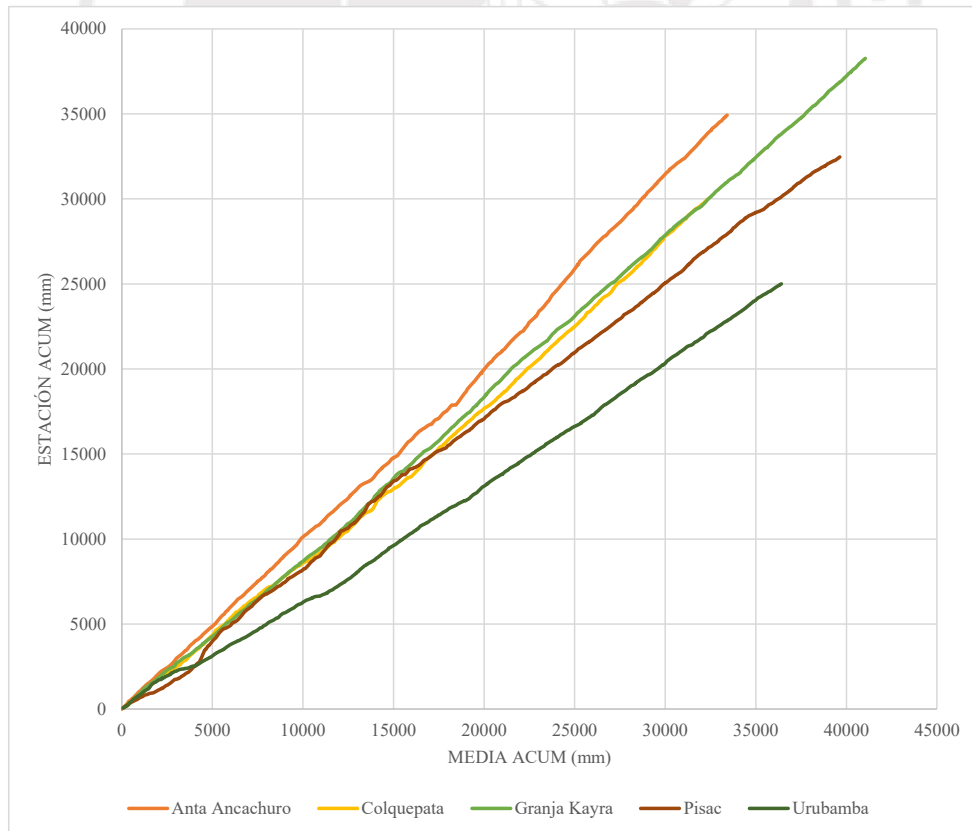


Figura 4.17 Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 3

Una vez seleccionada la estación base, se volvieron a construir los diagramas de doble masa, en los cuales, esta vez, las abscisas representan a los acumulados de la estación base y las ordenadas, los acumulados de la estación analizada. La estación seleccionada fue Granja Kayra. A continuación, se muestran los diagramas mencionados, con los cuales se podrá obtener los periodos n_1 , n_2 , n_3 , ..., que deberán evaluarse mediante el análisis estadístico. Cabe mencionar que, para mayor precisión en la definición del periodo confiable y el(los) dudoso(s), en caso de que solo se observaran dos periodos diferentes, se hizo uso del software gratuito Hydrognomon 4, el cual posee una herramienta para definir de forma automática el punto de quiebre entre ambos periodos.

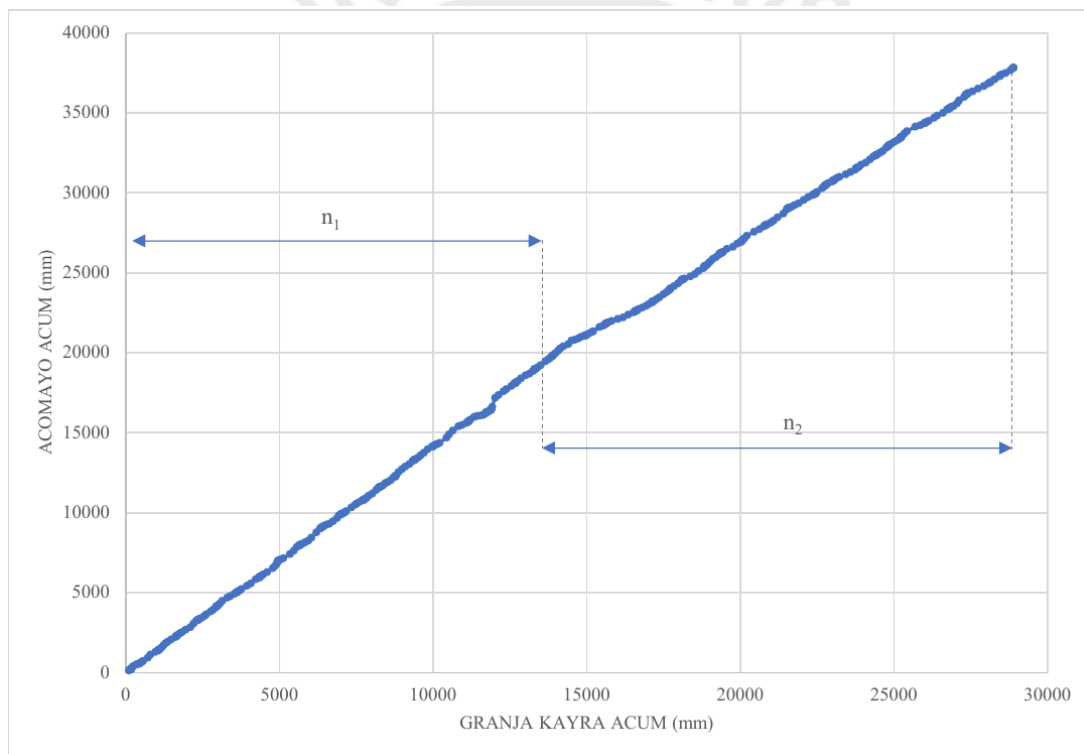


Figura 4.18 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Acomayo

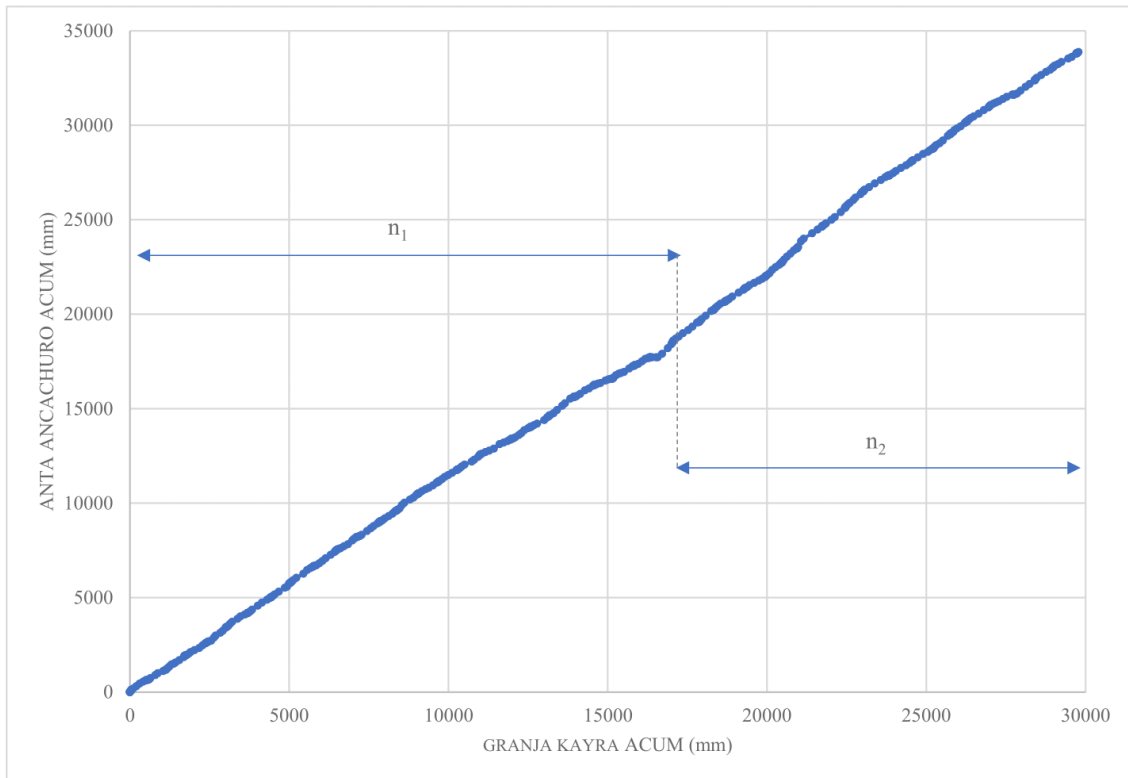


Figura 4.19 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Anta Ancachuro

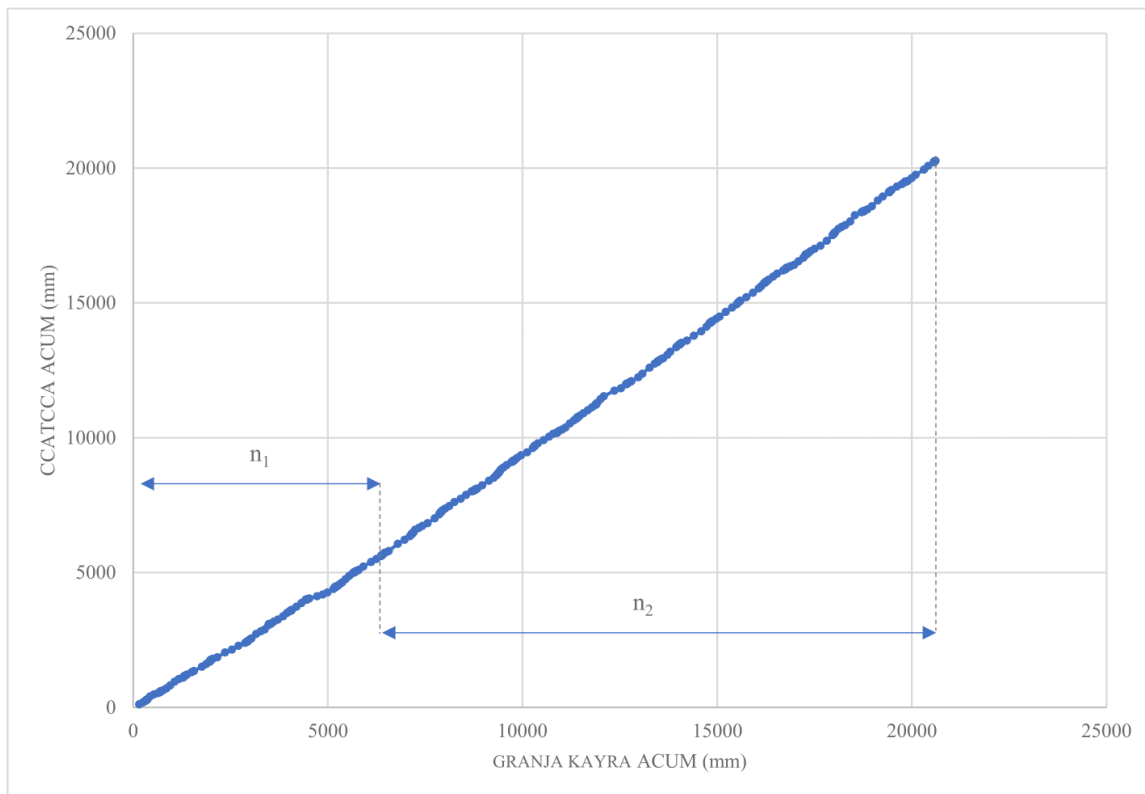


Figura 4.20 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Ccatcca

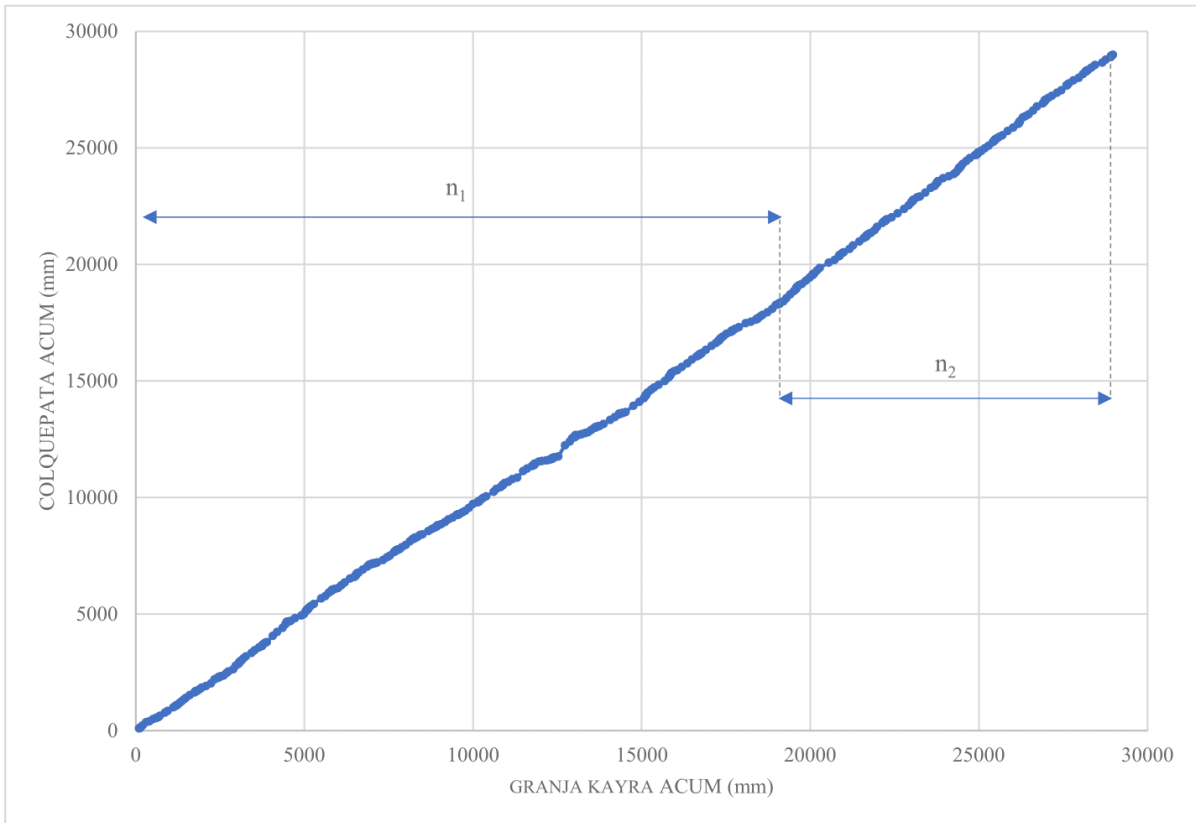


Figura 4.21 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Colquepata

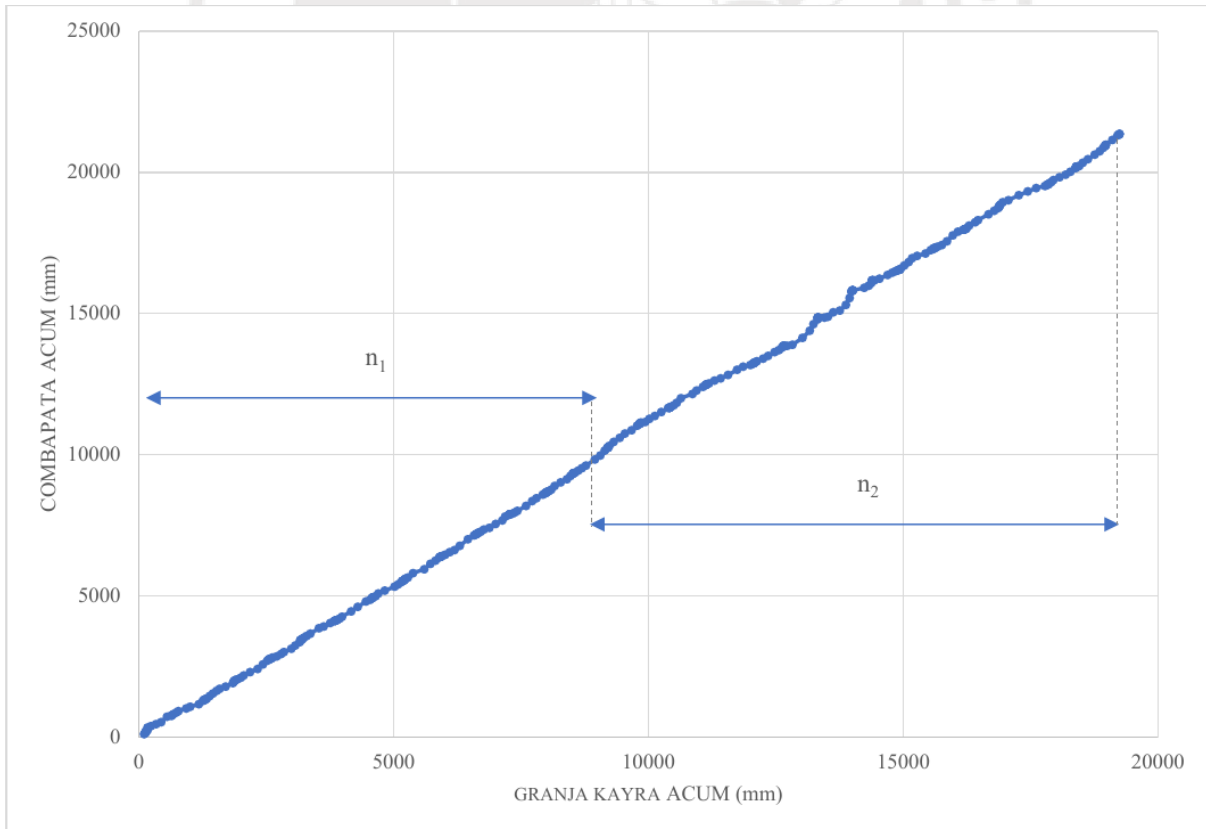


Figura 4.22 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Combapata

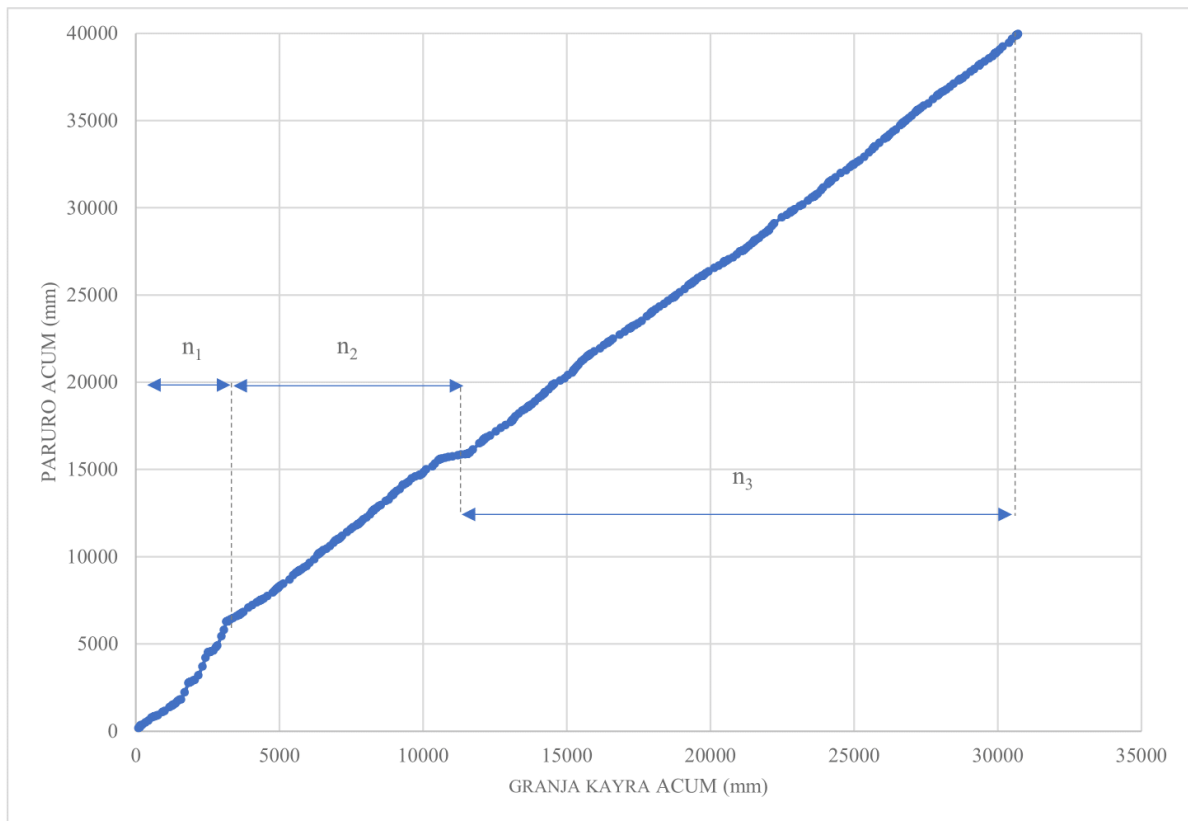


Figura 4.23 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Paruro

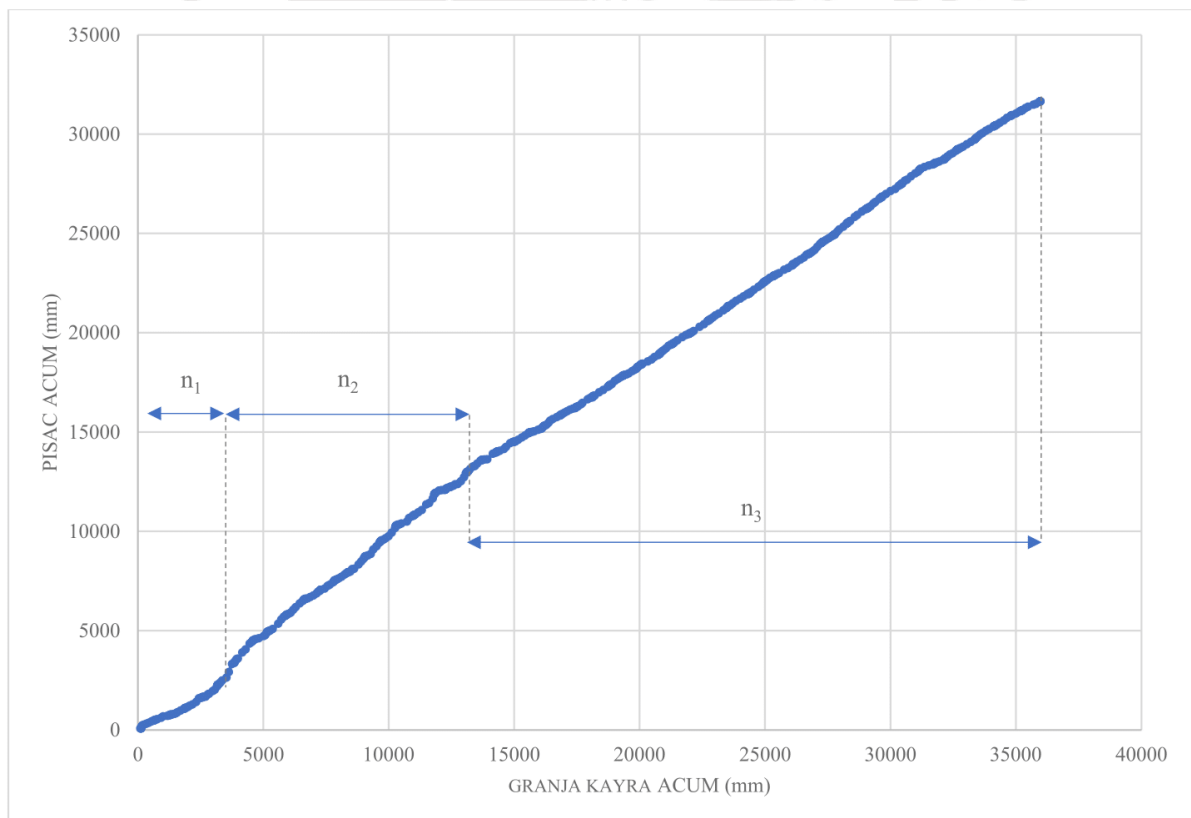


Figura 4.24 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pisac

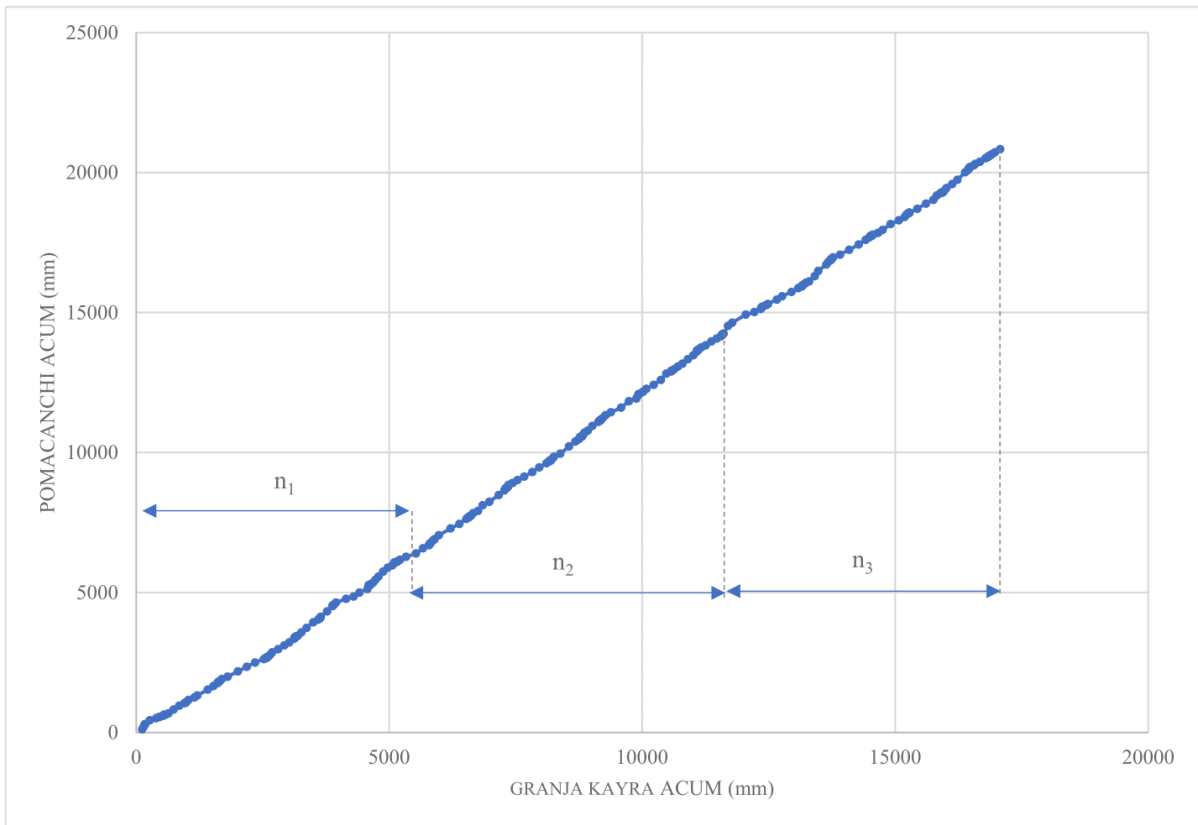


Figura 4.25 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pomacanchi

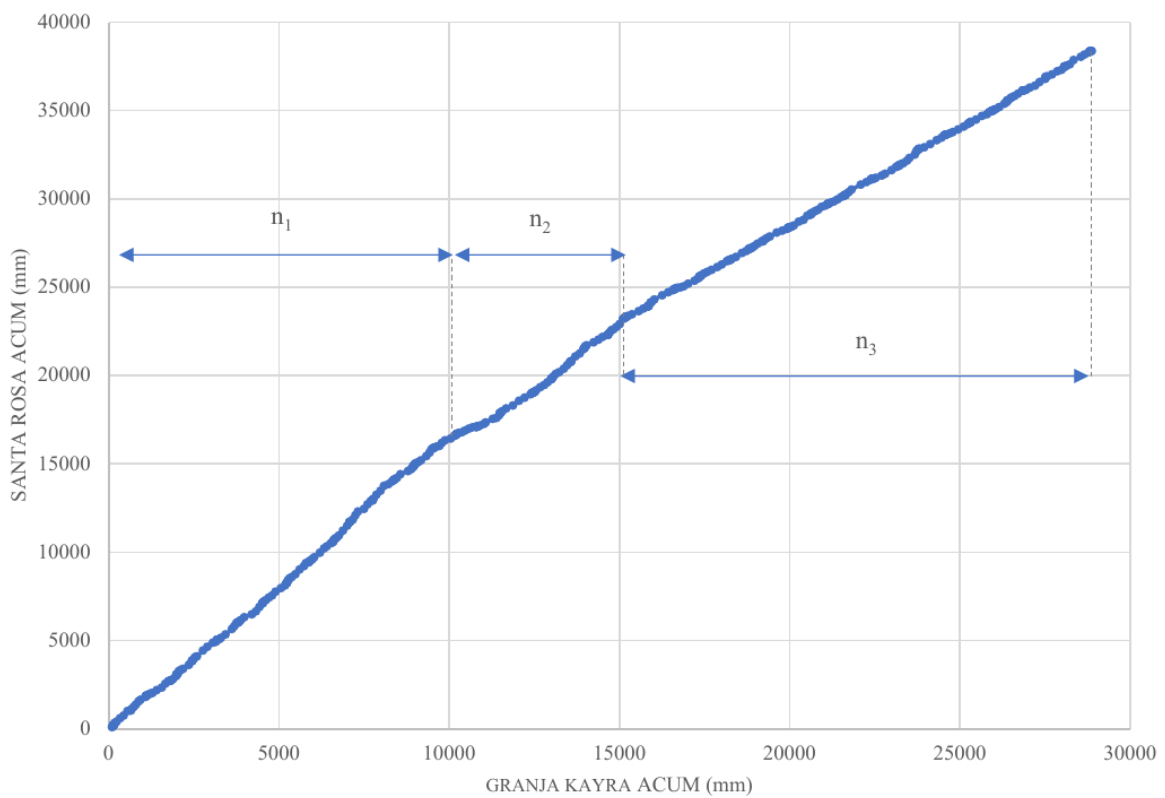


Figura 4.26 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Santa Rosa

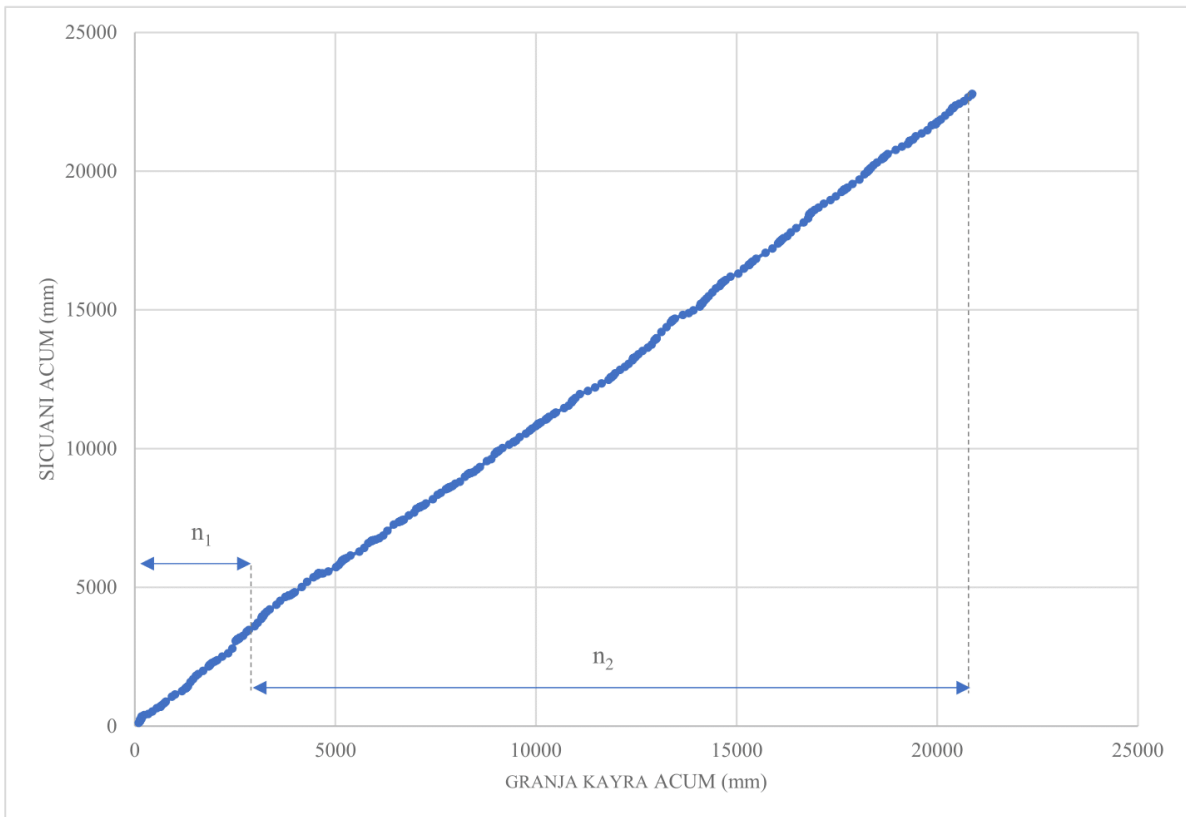


Figura 4.27 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Sicuani

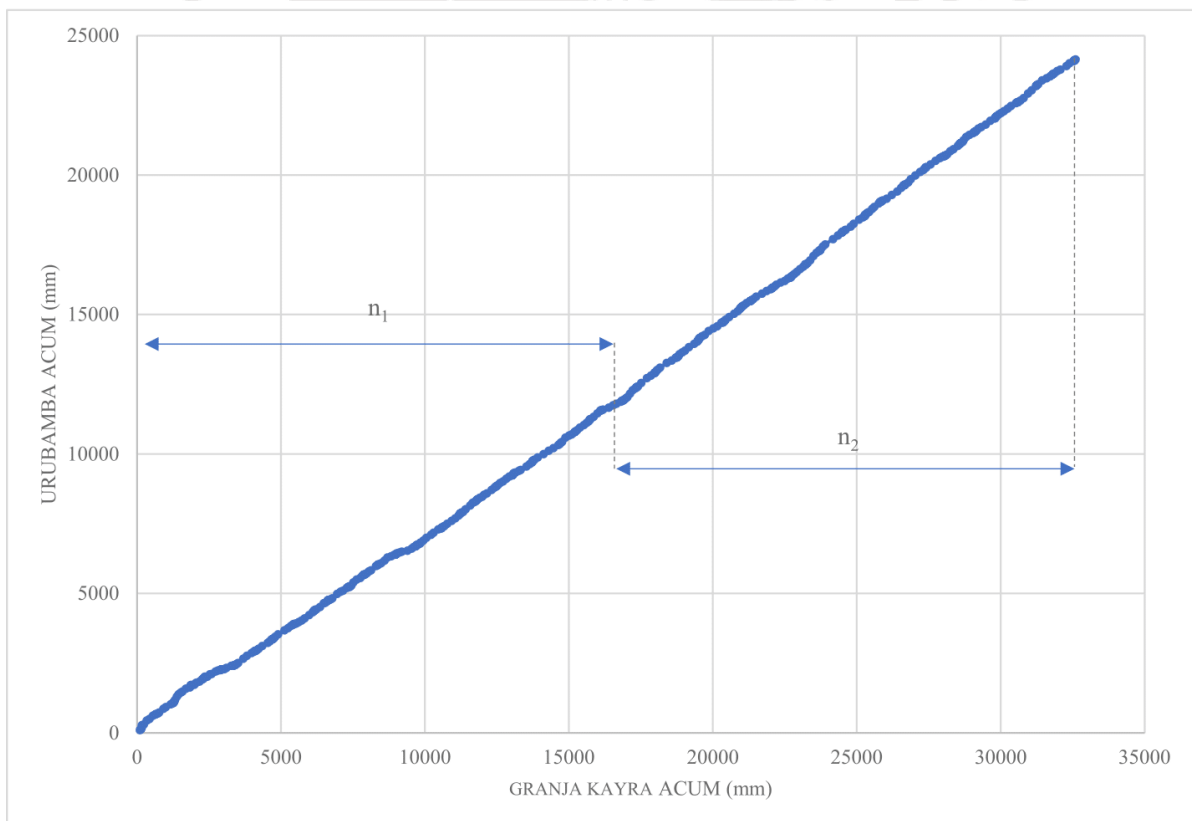


Figura 4.28 Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Urubamba

De los anteriores gráficos se puede observar que se tienen tres periodos de estudio para las estaciones Paruro, Pisac, Pomacanchi y Santa Rosa; mientras que se tienen solo dos periodos para las demás estaciones. En todos los casos, se tomó como el periodo más confiable aquel de mayor homogeneidad y/o longitud de años. La siguiente tabla muestra los periodos de quiebre elegidos para cada serie de datos.

Tabla 4.3 *Periodos de información a evaluar en el análisis estadístico*

Estación	Periodo n ₁	Periodo n ₂	Periodo n ₃	Periodo más confiable
Acomayo	Ene 1964 – Feb 1990	Mar 1990 – Ago 2021	-	Ene 1964 – Feb 1990
Anta Ancachuro	Jun 1964 – Abr 2002	May 2002 – Dic 2022	-	Jun 1964 – Abr 2002
Ccatcca	Ene 1990 – Feb 2000	Mar 2000 – Dic 2022	-	Mar 2000 – Dic 2022
Colquepata	Mar 1964 – Abr 2007	May 2007 – Dic 2022	-	May 2007 – Dic 2022
Combapata	Feb 1964 – Ene 1978	Feb 1978 – Jun 1997	-	Feb 1964 – Ene 1978
Paruro	Ene 1964 – Oct 1969	Nov 1969 – Abr 1982	May 1986 – Dic 2022	May 1986 – Dic 2022
Pisac	Ene 1964 – Ene 1970	Feb 1970 – Mar 1985	Abr 1985 – Dic 2022	Abr 1985 – Dic 2022
Pomacanchi	Feb 1985 – Ene 2000	Feb 2000 – May 2009	Junio 2009 – Dic 2022	Feb 2000 – May 2009
Santa Rosa	Ene 1964 – Feb 1991	Mar 1991 – Feb 1999	Mar 1999 – Dic 2022	Mar 1999 – Dic 2022
Sicuani	Ene 1964 – Dic 1968	Ene 1969 – Jul 2022	-	Ene 1969 – Jul 2022
Urubamba	Ene 1964 – Dic 1997	Ene 1998 – Dic 2022	-	Ene 1998 – Dic 2022

4.1.2.3 *análisis estadístico.*

4.1.2.3.1 *análisis de saltos.*

Mediante el software Microsoft Excel se realizaron las pruebas t de Student y F de Fisher a las series pluviométricas. La siguiente tabla muestra los resultados de aplicar ambas pruebas y si es necesario corregir algún periodo de información en alguna estación.

Tabla 4.4 *Resultados del Análisis de saltos*

Estación	Periodos a analizar	Media (mm)	Varianza (mm ²)	$ t_c $	t_t	F_c	F_t
Acomayo	Ene 1964 – Feb 1990	77.0	6623.5	1.211	1.964	1.408	1.224
	Mar 1990 – Ago 2021	69.1	4703.0				
Anta Ancachuro	Jun 1964 – Abr 2002	61.2	3867.3	1.371	1.965	1.217	1.223
	May 2002 – Dic 2022	68.9	4706.3				
Ccatcca	Ene 1990 – Feb 2000	48.3	2446.9	1.678	1.966	1.463	1.305
	Mar 2000 – Dic 2022	58.9	3578.9				
Colquepata	Mar 1964 – Abr 2007	56.0	3635.7	0.881	1.965	1.074	1.243
	May 2007 – Dic 2022	60.8	3384.7				

Estación	Periodos a analizar	Media (mm)	Varianza (mm ²)	$ t_c $	t_t	F_c	F_t
Combapata	Feb 1964 – Ene 1978	59.0	3074.7	0.468	1.967	1.340	1.284
	Feb 1978 – Jun 1997	62.0	4121.4				
Paruro (periodos n ₁ y n ₃)	Mar 1964 – Oct 1969	93.2	21276.1	2.075	1.965	3.898	1.335
	May 1986 – Dic 2022	69.1	5457.9				
Paruro (periodos n ₂ y n ₃)	Nov 1969 – Abr 1982	68.9	4848.4	0.019	1.965	1.126	1.272
	May 1986 – Dic 2022	69.1	5457.9				
Pisac (periodos n ₁ y n ₃)	Ene 1964 – Ene 1970	38.1	1765.0	1.216	1.965	1.404	1.372
	Abr 1985 – Dic 2022	45.6	2478.6				
Pisac (periodos n ₂ y n ₃)	Feb 1970 – Mar 1985	61.2	5712.1	2.935	1.964	2.305	1.230
	Abr 1985 – Dic 2022	45.6	2478.6				
Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Ene 2000	65.5	3569.4	1.058	1.971	1.301	1.382
	Feb 2000 – May 2009	74.8	4643.4				
Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	Feb 2000 – May 2009	74.8	4643.4	0.405	1.969	1.137	1.350
	Junio 2009 – Dic 2022	71.2	5279.3				
Santa Rosa (periodos n ₁ y n ₃)	Ene 1964 – Feb 1991	86.1	6906.6	2.976	1.965	1.478	1.247
	Mar 1999 – Dic 2022	64.8	4673.9				
Santa Rosa (periodos n ₂ y n ₃)	Mar 1991 – Feb 1999	73.5	5094.8	1.023	1.967	1.090	1.317
	Mar 1999 – Dic 2022	64.8	4673.9				
Sicuari	Ene 1964 – Dic 1968	61.1	3274.0	0.088	1.964	1.081	1.414
	Ene 1969 – Jul 2022	60.4	3538.3				
Urubamba	Ene 1964 – Dic 1997	39.6	1595.8	1.570	1.964	1.319	1.211
	Ene 1998 – Nov 2022	45.2	2104.4				

Tabla 4.5 Periodos de información a corregir

Estación	$\hat{\iota} t_c < t_t?$	$\hat{\iota} F_c < F_t?$	$\hat{\iota}$ Se corrige la información?	Periodo a corregir
Acomayo	Sí	No	Sí	Mar 1990 – Ago 2021
Anta Ancachuro	Sí	Sí	No	-
Ccatcca	Sí	No	Sí	Ene 1990 – Feb 2000
Colquepata	Sí	Sí	No	-
Combapata	Sí	No	Sí	Feb 1978 – Jun 1997
Paruro (periodos n ₁ y n ₃)	No	No	Sí	Ene 1964 – Oct 1969
Paruro (periodos n ₂ y n ₃)	Sí	Sí	No	-
Pisac (periodos n ₁ y n ₃)	No	No	Sí	Ene 1964 – Ene 1970
Pisac (periodos n ₂ y n ₃)	No	No	Sí	Feb 1970 – Mar 1985
Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Sí	Sí	No	-
Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	Sí	Sí	No	-
Santa Rosa (periodos n ₁ y n ₃)	No	No	Sí	Ene 1964 – Feb 1991
Santa Rosa (periodos n ₂ y n ₃)	Sí	Sí	No	-
Sicuari	Sí	Sí	No	-
Urubamba	Sí	No	Sí	Ene 1964 – Dic 1997

Una vez identificados los periodos de información a corregir, se aplicaron las correspondientes ecuaciones de regresión lineal para cada uno. Luego, con las series ya libres de saltos, las tendencias en la media y en la desviación estándar fueron analizadas.

4.1.2.3.2 *análisis de tendencias.*

Primero se realizó el análisis de tendencia en la media. Se obtuvieron todos los resultados comentados anteriormente en la sección 3.2.1 para cada una de las estaciones. Como se menciona en la literatura, si el valor de $|t_c|$ es mayor que el de t_t , la serie contiene una tendencia significativa que debe eliminarse. Las series a las cuales se les eliminó dicha tendencia consistieron en aquellas pertenecientes a las estaciones Ccatcca y Urubamba. La siguiente tabla muestra los resultados del análisis.

Tabla 4.6 *Resultados del análisis de tendencia en la media*

Estación	n	GL	R	$ t_c $	t_t	¿Se corrige la información?
Acomayo	531	529	0.020	0.454	1.960	No
Anta Ancachuro	541	539	0.046	1.062	1.960	No
Ccatcca	384	382	0.132	2.601	1.960	Sí
Colquepata	519	517	0.045	1.016	1.960	No
Combapata	354	352	0.005	0.092	1.960	No
Granja Kayra	682	680	0.021	0.549	1.960	No
Paruro	574	572	0.016	0.392	1.960	No
Pisac	666	664	0.011	0.271	1.960	No
Pomacanchi	360	358	0.026	0.490	1.960	No
Santa Rosa	538	536	0.002	0.056	1.960	No
Sicuani	544	542	0.023	0.545	1.960	No
Urubamba	591	589	0.134	3.273	1.960	Sí

Ya con la información corregida, se realizó el análisis de tendencia en la desviación estándar para cada serie. Se obtuvieron todos los resultados señalados en la sección 3.2.1, con los cuales se pudo definir los periodos a corregir de cada estación. Como se mencionó anteriormente, si el valor de $|t_c|$ es mayor que el de t_t , el periodo en estudio contiene una tendencia significativa que debe eliminarse. Todas las series contenían un periodo al menos

que corregir, a excepción de las pertenecientes a las estaciones Ccatcca y Pomacanchi. A continuación, se muestran dichos periodos.

Tabla 4.7 Resultados del análisis de tendencia en la desviación estándar

Estación	Año	n	GL	R	$ t_c $	t_t
Acomayo	1972	12	10	-0.589	2.304	2.228
	2003	11	9	0.635	2.464	2.262
	2022	7	5	-0.801	2.994	2.571
Anta Ancachuro	1964	7	5	0.819	3.186	2.571
	1989	12	10	-0.594	2.334	2.228
	1992	12	10	-0.705	3.142	2.228
Colquepata	1984	12	10	-0.602	2.382	2.228
	2000	12	10	-0.635	2.600	2.228
Combapata	1983	11	9	-0.696	-2.910	2.262
	1984	12	10	-0.616	-2.475	2.228
	1996	8	6	-0.792	-3.183	2.447
Granja Kayra	1996	8	6	-0.809	3.373	2.447
	2022	11	9	-0.650	2.566	2.262
Paruro	1969	11	9	-0.630	2.435	2.262
	2022	12	10	-0.639	2.625	2.228
	1974	12	10	-0.599	2.364	2.228
Pisac	1976	12	10	-0.576	2.230	2.228
	1978	12	10	-0.615	2.468	2.228
	1979	12	10	-0.609	2.426	2.228
Santa Rosa	1989	12	10	-0.629	2.557	2.228
	1987	10	8	-0.650	2.421	2.306
	2001	12	10	-0.619	2.491	2.228
Sicuani	2015	11	9	-0.647	2.546	2.262
	1971	12	10	-0.616	2.474	2.228
	1974	10	8	-0.678	2.610	2.306
Urubamba	1978	8	6	-0.727	2.594	2.447
	2022	7	5	-0.784	2.821	2.571
Urubamba	1974	10	8	-0.703	2.798	2.306

Finalmente, teniendo la información corregida completamente, se procedió a completar y extender la información mediante generación de números aleatorios.

4.1.3 Completación y extensión de la información.

Se procedió a completar la información correspondiente a todas las estaciones. Luego de completar la información de las once estaciones, se obtuvieron los valores de las nuevas medias

y varianzas. Las nuevas varianzas resultaron menores a las de las series incompletas y las nuevas medias fueron similares, lo cual denota que todas son homogéneas, a excepción del caso de Combapata, debido a que no fue posible generar una nueva serie con una varianza menor y una media similar. Ver Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Media y varianza de las series pluviométricas antes y después de la completación

Estación	Media 1 (mm)	Media 2 (mm)	Varianza 1 (mm ²)	Varianza 2 (mm ²)
Acomayo	77.02	75.98	6534.08	6325.85
Anta Ancachuro	66.79	68.44	4752.02	4310.34
Ccateca	53.58	55.96	2938.76	2409.88
Colquepata	58.46	56.20	3817.39	3601.91
Combapata	70.63	-	57301.00	-
Granja Kayra	56.72	56.78	3310.33	3528.44
Paruro	68.85	68.71	5364.32	5121.72
Pisac	45.63	45.76	2626.87	2614.90
Pomacanchi	70.65	73.91	4585.85	3873.93
Santa Rosa	66.75	65.64	4733.07	4516.71
Sicuani	62.65	61.19	4361.13	4002.02
Urubamba	40.05	39.14	1590.58	1530.19

Finalmente se obtuvieron los registros históricos completos de la variable de Precipitación Total Mensual de las once estaciones pluviométricas. Luego, con el objetivo de poder utilizar estos resultados en los modelos precipitación-escorrentía, se calculó la precipitación media areal en toda la cuenca.

4.1.4 Cálculo de la precipitación total media areal.

El Anexo A muestra los valores medios areales obtenidos mediante el método de Kriging usando el software Hydraccess.

4.2 Temperatura Media Mensual

4.2.1 Descripción de la información meteorológica.

Se obtuvieron los datos de doce estaciones meteorológicas. Sin embargo, no todas las estaciones contaban con, por lo menos, veinticinco años de registro de información para esta

variable meteorológica. Por ello, solo se utilizó la información proveniente de nueve estaciones, cuyas características serán descritas posteriormente.

La Tabla 4.9 muestra los nombres de las estaciones, su ubicación y la longitud de registro histórico de cada una (donde se obvian las lagunas de información). Así, en la Tabla 4.10 se incluyen el número de años con al menos un dato mensual, los años completos y su correspondiente porcentaje con respecto a los 59 años por completar. La Figura 4.29 se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones; además, la Figura 4.30 incluye un gráfico que ilustra la continuidad de la información.

Tabla 4.9 Estaciones meteorológicas escogidas para el estudio

Estación	Código	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)	Longitud de registro
Acomayo	000687	71° 41' "W"	13° 55' "S"	3212	May 1965 – Ago 2021
Anta Ancachuro	000684	72° 13' "W"	13° 28' "S"	3324	Jul 1965 – Dic 2022
Ccatcca	000690	71° 33' "W"	13° 36' "S"	3681	Ene 1990 – Dic 2022
Granja Kayra	000607	71° 52' "W"	13° 33' "S"	3214	Feb 1964 – Nov 2022
Paruro	000686	71° 50' "W"	13° 46' "S"	3070	May 1965 – Dic 2022
Pisac	000844	71° 51' "W"	13° 25' "S"	2990	Mar 1997 – Dic 2022
Pomacanchi	000812	71° 34' "W"	14° 1' "S"	3690	Feb 1985 – Dic 2022
Sicuani	000759	71° 14' "W"	14° 14' "S"	3534	Set 1992 – Dic 2022
Urubamba	000683	72° 7' "W"	13° 18' "S"	2850	Jun 1965 – Dic 2022

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Tabla 4.10 Estaciones hidrometeorológicas escogidas para el estudio

Estación	Años totales	Años completos	% Información disponible
Acomayo	57	40	67.8%
Anta Ancachuro	57	41	69.5%
Ccatcca	33	27	45.8%
Granja Kayra	59	42	71.2%
Paruro	50	41	69.5%
Pisac	26	21	35.6%
Pomacanchi	37	24	40.7%
Sicuani	31	21	35.6%
Urubamba	49	38	64.4%

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

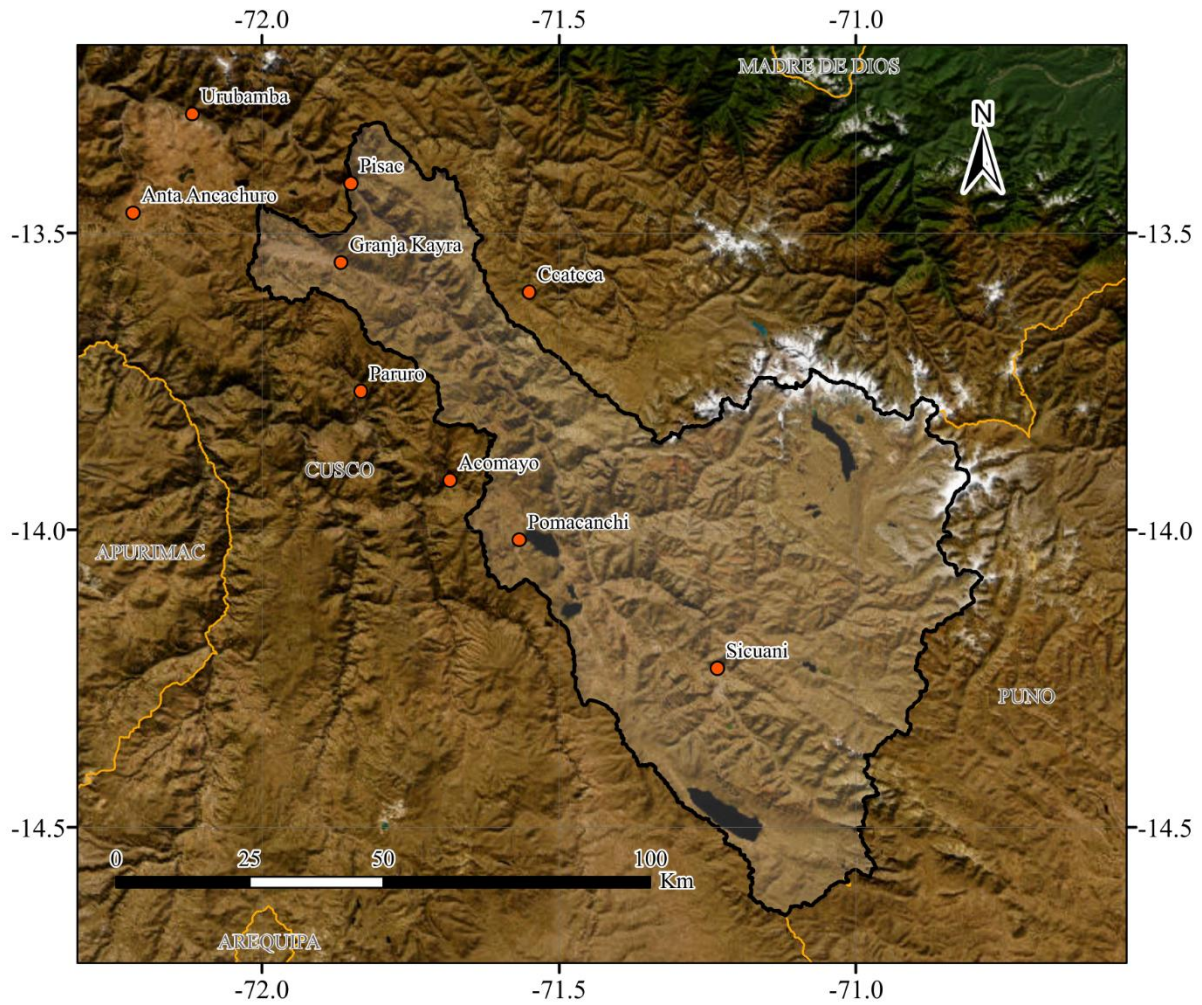


Figura 4.29 Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas

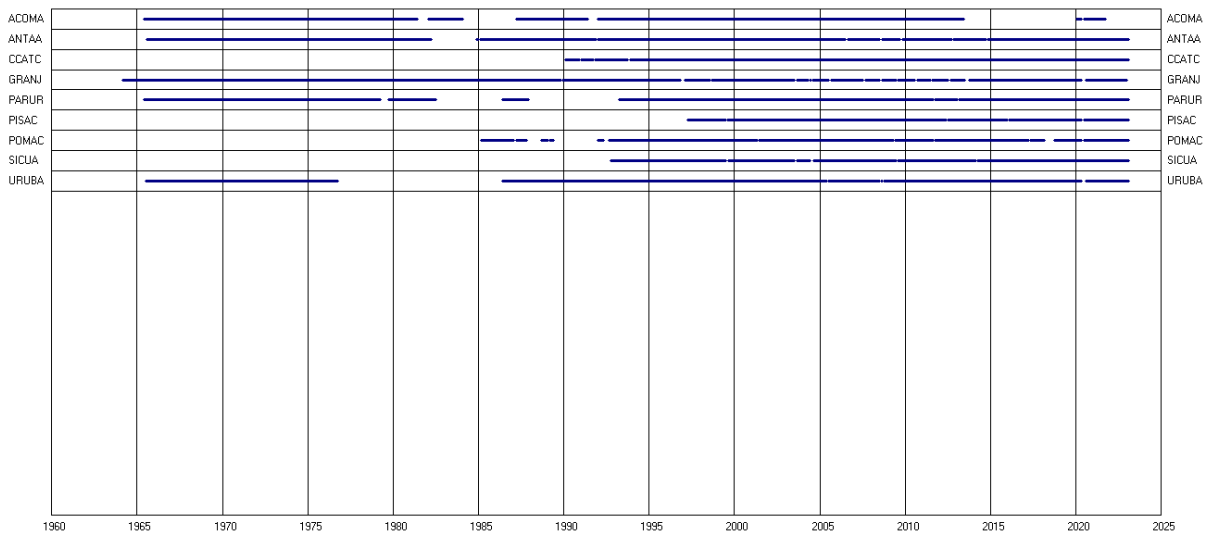


Figura 4.30 Gráfico de continuidad de la información meteorológica

A continuación, se describe el proceso del análisis de consistencia de la información.

4.2.2 Análisis de consistencia.

4.2.2.1 análisis visual gráfico.

Mediante el ploteo de las series de tiempo mensuales se hizo una inspección visual para afirmar, anticipadamente, que la información es consistente, o, en el otro caso, que existe(n) período(s) donde la información es dudosa. A continuación, se incluyen observaciones acerca de las características de las series de tiempo.

La información meteorológica de la estación Acomayo demuestra homogeneidad a lo largo de todo su registro, a excepción del periodo 1979-1982, donde los valores de temperatura se mantuvieron aproximadamente por debajo de 14 °C. Ver Figura 4.31.

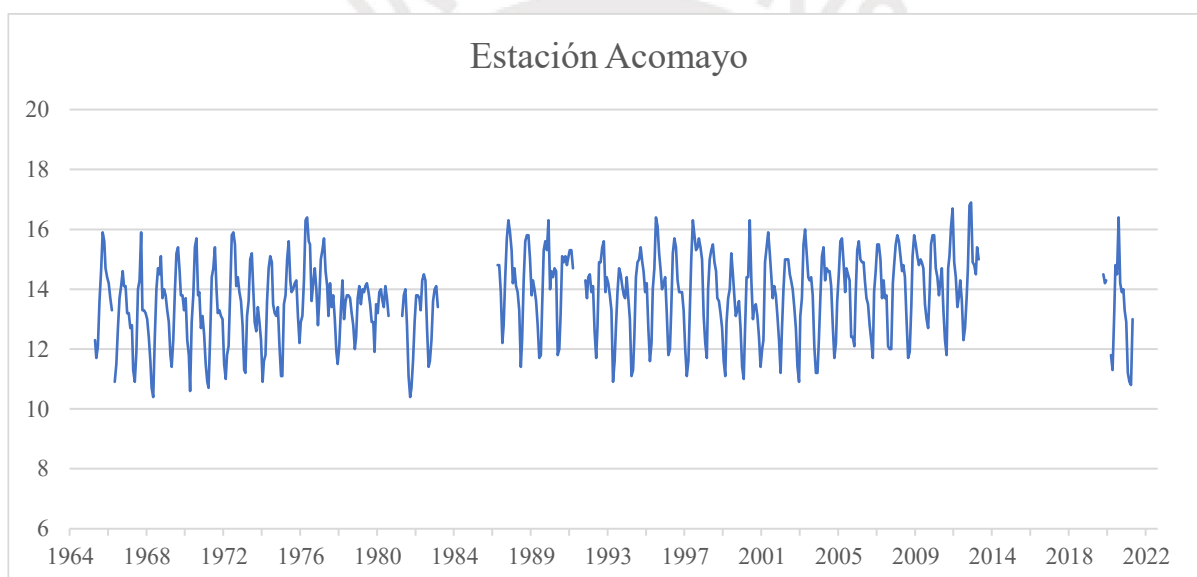


Figura 4.31 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Acomayo

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Anta Ancachuro demuestran homogeneidad en todo su registro, aunque existe un salto en Junio de 1985, donde se registró el valor mínimo de 7.7 °C. Ver Figura 4.32.

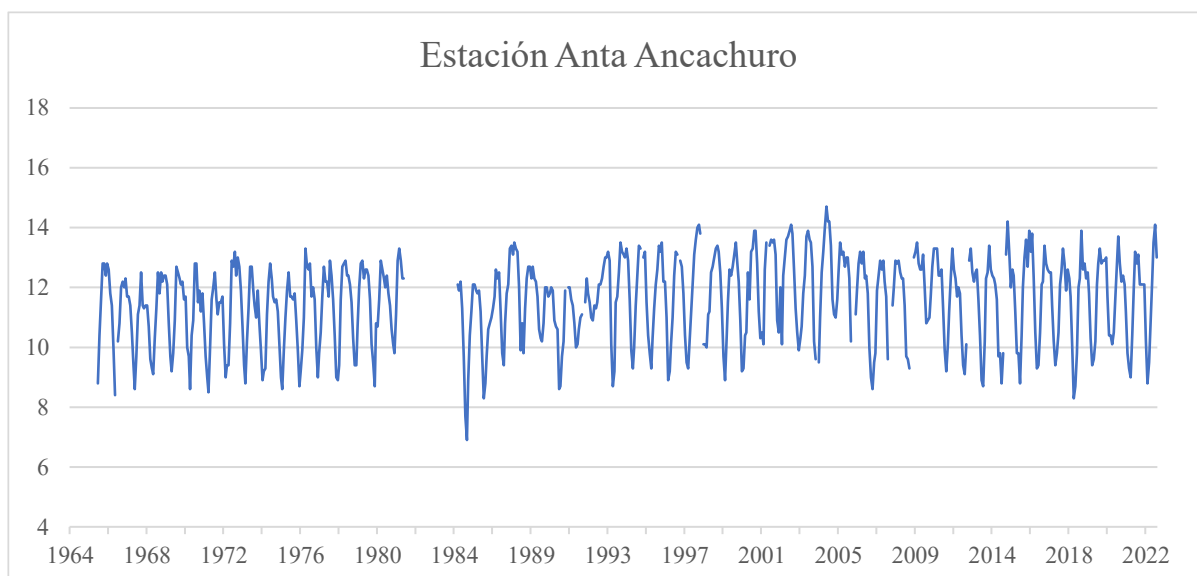


Figura 4.32 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Anta Ancachuro

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Ccatcca demuestran homogeneidad a lo largo de todo su registro, sin alguna otra observación. Ver Figura 4.33.

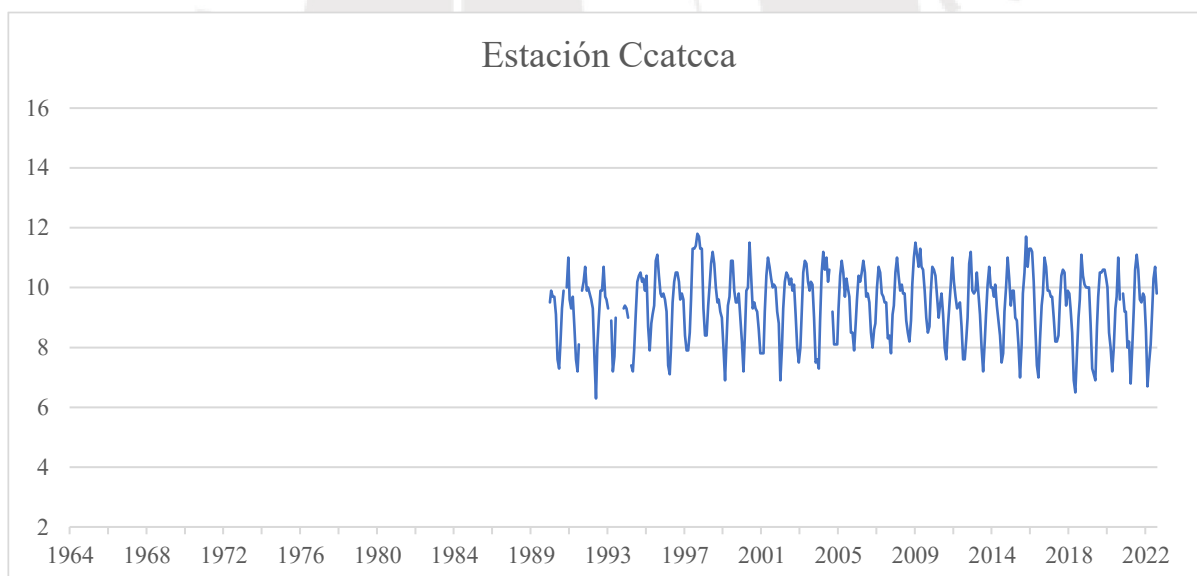


Figura 4.33 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Ccatcca

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Granja Kayra demuestran ser homogéneos. Solo se nota la presencia de un salto, ocurrido en Noviembre de 2020, en el que se registró 16.3 °C, la mayor temperatura registrada en toda la serie. Ver Figura 4.34.

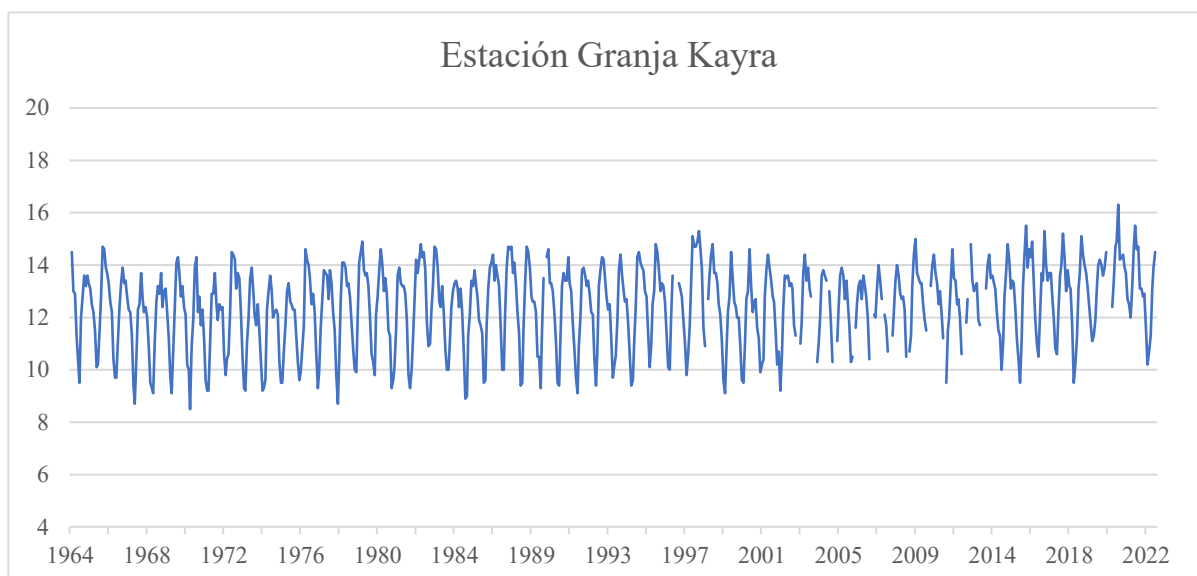


Figura 4.34 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Granja Kayra

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Paruro demuestran ser homogéneos a lo largo de todo su registro, a excepción del periodo 1965-1971, donde la temperatura se mantuvo por encima de los 12 °C. Ver Figura 4.35.

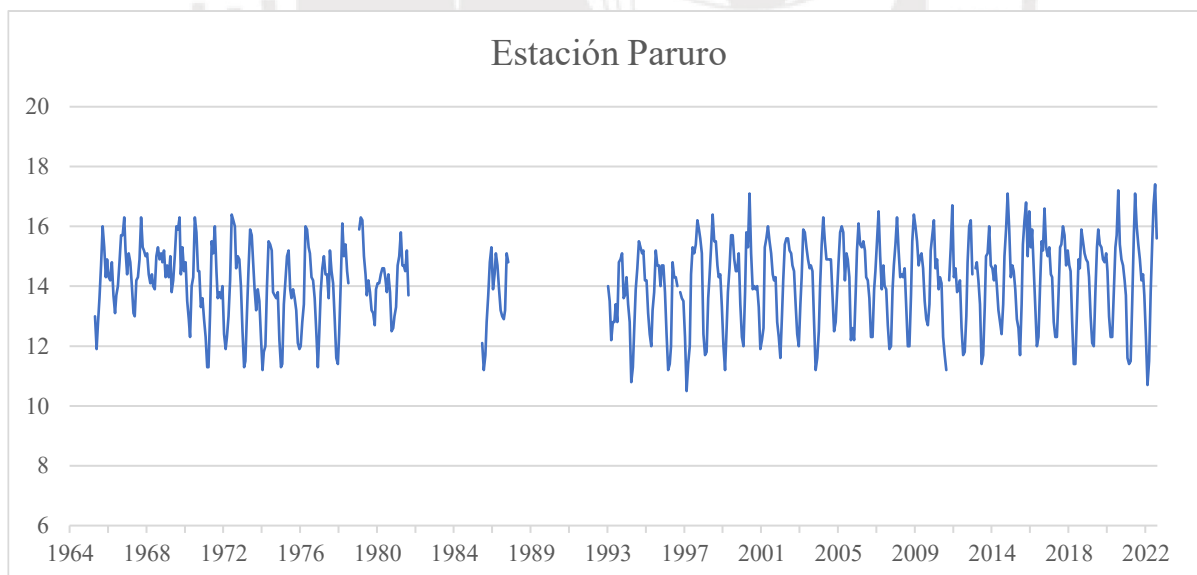


Figura 4.35 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Paruro

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Pisac demuestran homogeneidad a lo largo de todo su registro, sin alguna otra observación. Ver Figura 4.36.

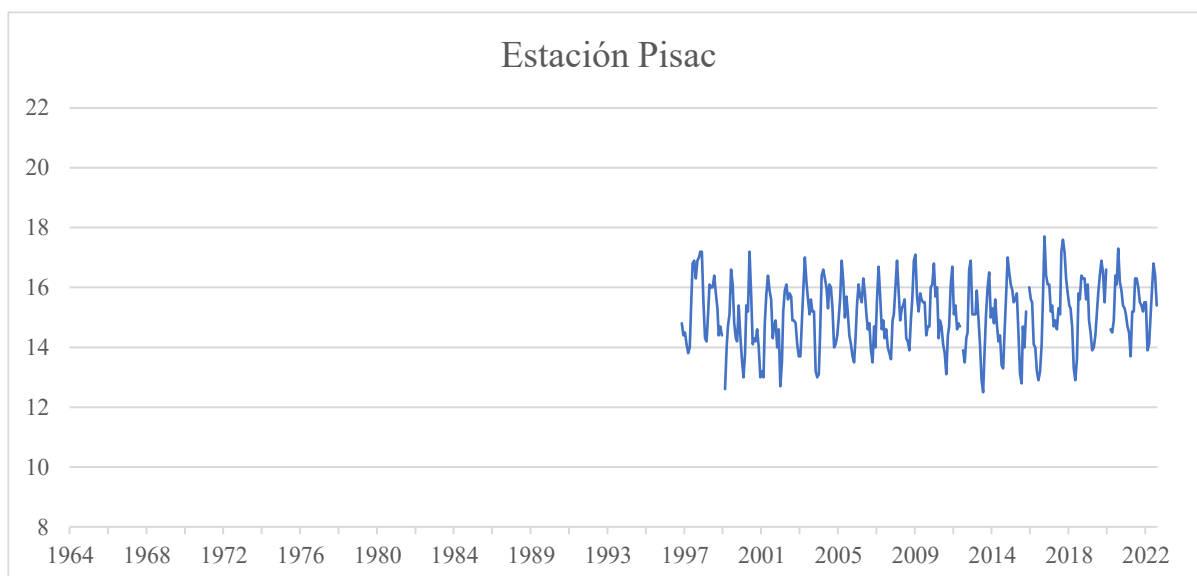


Figura 4.36 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Pisac

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Pomacanchi demuestran ser homogéneos. Solo se nota la presencia de un pequeño salto, ocurrido en Julio de 1985, donde se registró 6.8 °C.

Ver Figura 4.37.

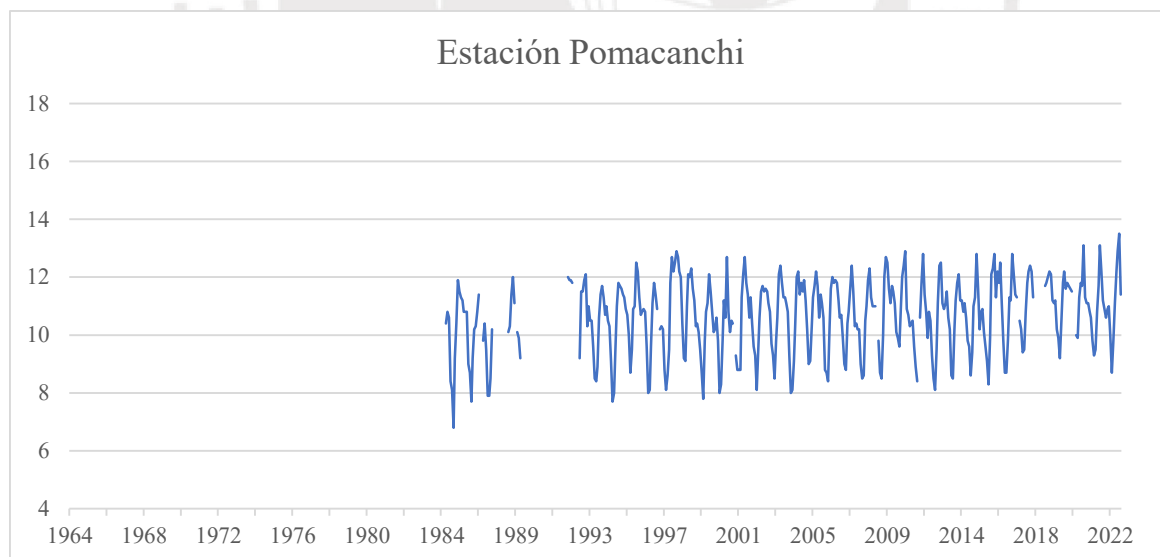


Figura 4.37 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Pomacanchi

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Sicuani demuestran ser homogéneos en todo su registro histórico, sin embargo, puede observarse que a partir del año 2009 se ha empezado a alcanzar valores más extremos de baja temperatura. Ver Figura 4.38.

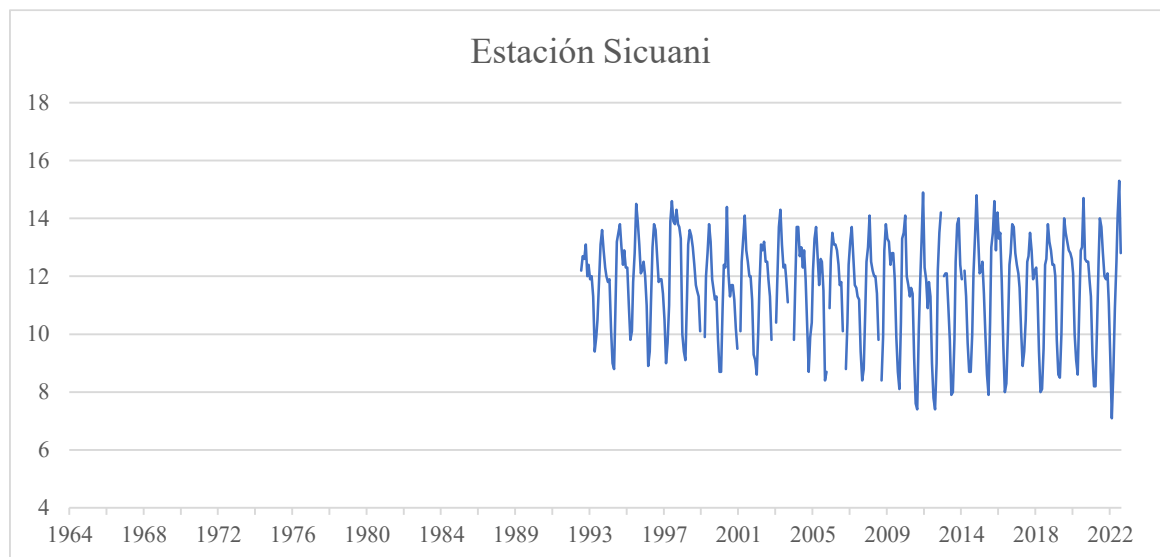


Figura 4.38 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Sicuani

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

Los datos meteorológicos de la estación Urubamba solo demuestran homogeneidad en el periodo entre 1986 y 2005. El periodo entre 1965 y 1976 demuestra una baja en la media y el periodo entre 2005 y 2022 demuestra una subida en la media. Ver Figura 4.39.

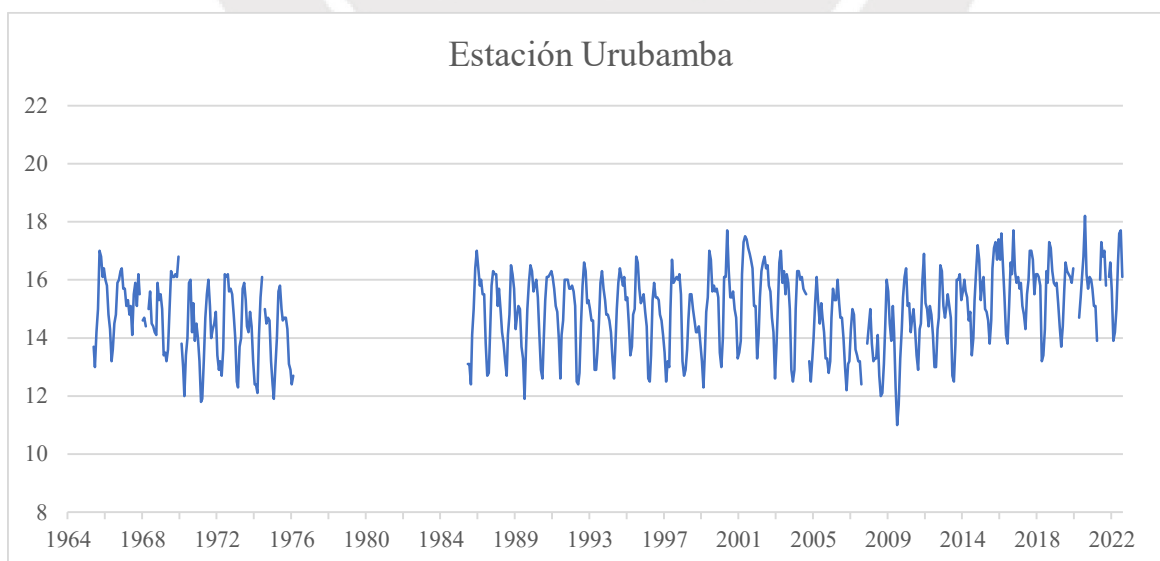


Figura 4.39 Serie histórica de la Temperatura Media Mensual (°C) – Estación Urubamba

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

4.2.2.2 *análisis de doble masa.*

El Anexo B contiene los diagramas de doble masa de cada una de las nueve estaciones, donde las abscisas representan los acumulados de los promedios de las temperaturas medias mensuales de todas las estaciones meteorológicas, y las ordenadas representan los acumulados de las temperaturas medias mensuales de cada estación. Para esta variable, todos los diagramas formaron una línea recta, sin presentarse saltos y/o cambios de pendiente. No obstante, la estación Granja Kayra fue seleccionada como la más confiable, debido a que contenía más información.

Una vez seleccionada la estación base, se volvieron a construir los diagramas de doble masa, en los cuales, esta vez, las abscisas representan a los acumulados de la estación base y las ordenadas representan los acumulados de la estación analizada. El Anexo C contiene los diagramas mencionados, los cuales formaron una línea recta, como en el anterior paso. Para definir los periodos n_1 , n_2 , n_3 , ..., que deberán ser estudiados mediante el análisis estadístico, se decidió hacer uso de los nueve anteriores gráficos, mediante los cuales también se pueden detectar saltos y tendencias. Se tomó como el periodo más confiable, en todos los casos, se a aquel de mayor homogeneidad y/o longitud de años. La siguiente tabla contiene los periodos de quiebre elegidos para cada serie de datos.

Tabla 4.11 *Periodos de información a evaluar en el análisis estadístico*

Estación	Periodo n_1	Periodo n_2	Periodo n_3	Periodo más confiable
Acomayo	May 1965 – Jul 2012	Ago 2012 – Ago 2021	-	May 1965 – Jul 2012
Anta Ancachuro	Ene 1964 – Oct 1991	Dic 1991 – Dic 2022	-	Ene 1964 – Oct 1991
Ccateca	Ene 1990 – Mar 2017	Abr 2017 – Dic 2022	-	Ene 1990 – Mar 2017
Granja Kayra	Feb 1964 – May 2005	Ago 2005 – Nov 2022		Feb 1964 – May 2005
Paruro	May 1965 – Jul 1972	Ago 1972 – Dic 2022	-	Ago 1972 – Dic 2022
Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	Mar 2012 – Mar 1985	-	Mar 1997 – Feb 2012
Pomacanchi	Feb 1985 – Abr 1995	May 1995 – Ene 2018	Set 2018 – Dic 2022	May 1995 – Ene 2018
Sicuani	Set 1992 – Nov 2012	Ene 2013 – Dic 2022	-	Set 1992 – Nov 2012
Urubamba	Jun 1965 – Ago 1972	Set 1972 – Dic 2013	Ene 2014 – Dic 2022-	Set 1972 – Dic 2013

4.2.2.3 análisis estadístico.

4.2.2.3.1 análisis de saltos.

Mediante el software Microsoft Excel se realizaron las pruebas t de Student y F de Fisher a las series pluviométricas. La siguiente tabla contiene los resultados de la aplicación de ambas pruebas, así como si es necesario corregir algún periodo de información en alguna estación.

Tabla 4.12 Resultados del Análisis de saltos

Estación	Periodos a analizar	Media (mm)	Varianza (mm ²)	$ t_c $	t_t	F_c	F_t																																																																																																									
Acomayo	May 1965 – Jul 2012	13.7	1.8	0.769	1.964	1.563	1.517																																																																																																									
	Ago 2012 – Ago 2021	13.9	2.8					Anta Ancachuro	Ene 1964 – Oct 1991	11.2	2.7	5.427	1.964	1.227	1.206	Dic 1991 – Dic 2022	11.8	2.1	Ccatcca	Ene 1990 – Mar 2017	9.5	1.2	1.814	1.966	1.194	1.344	Abr 2017 – Dic 2022	9.2	1.5	Granja Kayra	Feb 1964 – May 2005	12.2	2.5	4.850	1.963	1.389	1.228	Ago 2005 – Nov 2022	12.9	1.8	Paruro	May 1965 – Jul 1972	14.3	1.3	1.429	1.964	1.460	1.334	Ago 1972 – Dic 2022	14.1	1.9	Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2	Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965
Anta Ancachuro	Ene 1964 – Oct 1991	11.2	2.7	5.427	1.964	1.227	1.206																																																																																																									
	Dic 1991 – Dic 2022	11.8	2.1					Ccatcca	Ene 1990 – Mar 2017	9.5	1.2	1.814	1.966	1.194	1.344	Abr 2017 – Dic 2022	9.2	1.5	Granja Kayra	Feb 1964 – May 2005	12.2	2.5	4.850	1.963	1.389	1.228	Ago 2005 – Nov 2022	12.9	1.8	Paruro	May 1965 – Jul 1972	14.3	1.3	1.429	1.964	1.460	1.334	Ago 1972 – Dic 2022	14.1	1.9	Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2	Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2						
Ccatcca	Ene 1990 – Mar 2017	9.5	1.2	1.814	1.966	1.194	1.344																																																																																																									
	Abr 2017 – Dic 2022	9.2	1.5					Granja Kayra	Feb 1964 – May 2005	12.2	2.5	4.850	1.963	1.389	1.228	Ago 2005 – Nov 2022	12.9	1.8	Paruro	May 1965 – Jul 1972	14.3	1.3	1.429	1.964	1.460	1.334	Ago 1972 – Dic 2022	14.1	1.9	Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2	Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																	
Granja Kayra	Feb 1964 – May 2005	12.2	2.5	4.850	1.963	1.389	1.228																																																																																																									
	Ago 2005 – Nov 2022	12.9	1.8					Paruro	May 1965 – Jul 1972	14.3	1.3	1.429	1.964	1.460	1.334	Ago 1972 – Dic 2022	14.1	1.9	Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2	Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																												
Paruro	May 1965 – Jul 1972	14.3	1.3	1.429	1.964	1.460	1.334																																																																																																									
	Ago 1972 – Dic 2022	14.1	1.9					Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2	Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																							
Pisac	Mar 1997 – Feb 2012	15.1	1.1	1.055	1.968	1.131	1.308																																																																																																									
	Mar 2012 – Mar 1985	15.2	1.2					Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																		
Pomacanchi (periodos n ₁ y n ₂)	Feb 1985 – Abr 1995	10.3	1.7	2.186	1.967	1.063	1.339																																																																																																									
	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6					Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1	Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																													
Pomacanchi (periodos n ₂ y n ₃)	May 1995 – Ene 2018	10.7	1.6	2.751	1.967	1.431	1.478																																																																																																									
	Set 2018 – Dic 2022	11.2	1.1					Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7	Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																																								
Sicuari	Set 1992 – Nov 2012	11.7	2.7	0.856	1.967	1.387	1.294																																																																																																									
	Ene 2013 – Dic 2022	11.5	3.7					Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																																																			
Urubamba (periodos n ₁ y n ₂)	Jun 1965 – Ago 1972	14.7	1.5	0.306	1.965	1.192	1.348																																																																																																									
	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7					Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																																																														
Urubamba (periodos n ₂ y n ₃)	Set 1972 – Dic 2013	14.7	1.7	7.685	1.965	1.496	1.313																																																																																																									
	Ene 2014 – Dic 2022	15.8	1.2																																																																																																													

Tabla 4.13 *Periodos de información a corregir*

Estación	$\zeta t_c < t_t?$	$\zeta F_c < F_t?$	ζ Se corrige la información?	Periodo a corregir
Acomayo	Sí	No	Sí	Ago 2012 – Ago 2021
Anta Ancachuro	No	No	Sí	Dic 1991 – Dic 2022
Ccatcca	Sí	Sí	No	-
Granja Kayra	No	No	Sí	Ago 2005 – Nov 2022
Paruro	Sí	No	Sí	My 1965 – Jul 1972
Pisac	Sí	Sí	No	-
Pomacanchi (periodos n_1 y n_2)	No	Sí	Sí	Feb 1985 – Abr 1995
Pomacanchi (periodos n_2 y n_3)	No	Sí	Sí	Set 2018 – Dic 2022
Sicuani	Sí	No	Sí	Ene 2013 – Dic 2022
Urubamba (periodos n_1 y n_2)	Sí	Sí	No	-
Urubamba (periodos n_2 y n_3)	No	No	Sí	Ene 2014 – Dic 2022

Una vez identificados los periodos de información a corregir, se aplicaron las correspondientes ecuaciones de regresión lineal para cada uno. Luego, con las series ya sin saltos, fueron analizadas las tendencias en la media y en la desviación estándar.

4.2.2.3.2 *análisis de tendencias.*

Primero fue realizado el análisis de tendencia en la media. Se obtuvieron todos los resultados comentados anteriormente en la sección 3.2.1 para cada una de las estaciones. Las series a las cuales se les eliminó dicha tendencia consistieron en aquellas pertenecientes a las estaciones Acomayo y Paruro. La siguiente tabla contiene los resultados de los análisis.

Tabla 4.14 *Resultados del análisis de tendencia en la media*

Estación	n	GL	R	$ t_c $	t_t	ζ Se corrige la información?
Acomayo	540	538	0.162	3.817	1.960	Sí
Anta Ancachuro	641	639	-0.010	0.244	1.960	No
Ccatcca	387	385	-0.009	0.168	1.960	No
Granja Kayra	675	673	0.067	1.746	1.960	No
Paruro	572	570	0.084	2.008	1.960	Sí
Pisac	305	303	0.099	1.730	1.960	No
Pomacanchi	393	391	0.049	0.967	1.960	No
Sicuani	351	349	-0.055	1.030	1.960	No
Urubamba	563	561	-0.001	0.034	1.960	No

Ya con la información corregida, se realizó el análisis de tendencia en la desviación estándar de cada serie. Se obtuvieron todos los resultados señalados en la sección 3.2.1, con los cuales se pudo definir los periodos a corregir de cada estación. Solo las series pertenecientes a las estaciones Acomayo, Paruro, Pisac y Urubamba contenían al menos un periodo que corregir. A continuación, se muestran dichos periodos.

Tabla 4.15 Resultados del análisis de tendencia en la desviación estándar

Estación	Año	n	GL	R	$ t_c $	t_t
Acomayo	1965	8	6	0.756	2.831	2.447
Paruro	1986	8	6	0.747	2.749	2.447
Pisac	1997	10	8	0.650	2.420	2.306
	2008	12	10	0.582	2.263	2.228
Urubamba	1976	8	6	-0.810	3.379	2.447
	1986	8	6	0.800	3.267	2.447

Finalmente, teniendo la información corregida completamente, se procedió a completar y extender la información mediante la técnica de generación de números aleatorios.

4.2.3 Completación y extensión de la información.

Luego de completar la información de las nueve estaciones, fueron obtenidas la media y la varianza para las series completas. En todos los casos, las series completas resultan ser homogéneas. Ver Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Media y varianza de las series meteorológicas antes y después de la completación

Estación	Media 1 (°C)	Media 2 (°C)	Varianza 1 (°C ²)	Varianza 2 (°C ²)
Acomayo	13.71	13.73	1.68	1.67
Anta Ancachuro	11.22	11.22	1.51	1.49
Ccatcca	9.43	9.46	1.29	1.28
Granja Kayra	12.25	12.23	2.74	2.70
Paruro	14.10	14.10	1.90	2.17
Pisac	15.11	15.16	1.39	1.35
Pomacanchi	10.65	10.59	1.63	1.60
Sicuani	11.71	11.67	2.40	2.39
Urubamba	14.70	14.74	2.09	2.05

Finalmente, se obtuvieron los registros históricos completos de la variable de Temperatura Media Mensual de cada estación pluviométrica. Luego, para poder utilizar estos resultados en los modelos precipitación-escorrentía, se calculó la temperatura media areal en toda la cuenca.

4.2.4 Cálculo de la temperatura media areal.

El Anexo D contiene los resultados al aplicar el método de Kriging mediante el software Hydraccess.

4.3 Evapotranspiración Potencial Media Mensual

La evapotranspiración mensual fue calculada siguiendo la Ecuación (3.1), para cada una de las ocho estaciones meteorológicas. El Anexo E contiene los valores de ETP para cada estación meteorológica. En el caso de que la ETP resultara mayor a la precipitación, se igualó su valor al de la precipitación. Finalmente, los valores medios areales de esta variable fueron calculados en toda la cuenca. Esta se encuentra en el Anexo F.

4.4 Caudal Promedio Mensual

Esta variable no tuvo un tratamiento previo, debido a que los procesos de calibración y validación deben realizarse con data “natural”. Se muestra información acerca de la única estación hidrológica que registró suficiente información histórica, su ubicación y la data de caudal a utilizar.

Tabla 4.17 Estación hidrológica escogida para el estudio

Estación	Código	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Longitud de registro
Pisac	230401	71°51' "W"	13°25' "S"	2966	Ene 1964 – Dic 2020

Nota. Tomada de información proporcionada por el SENAMHI.

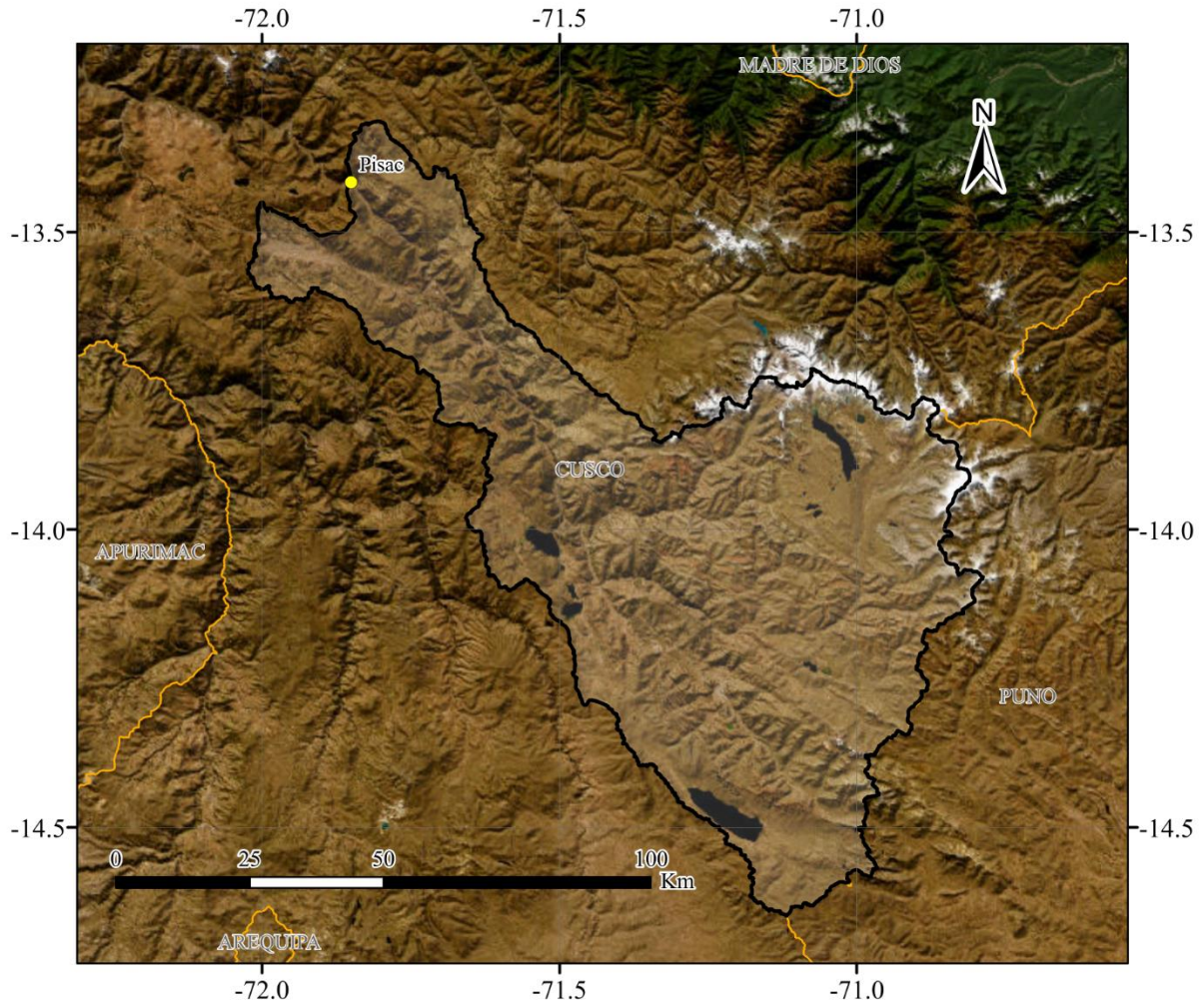


Figura 4.40 Ubicación geográfica de la estación hidrológica

La siguiente figura agrupa los valores calculados de precipitación, evapotranspiración potencial y caudal, expresados en mm:

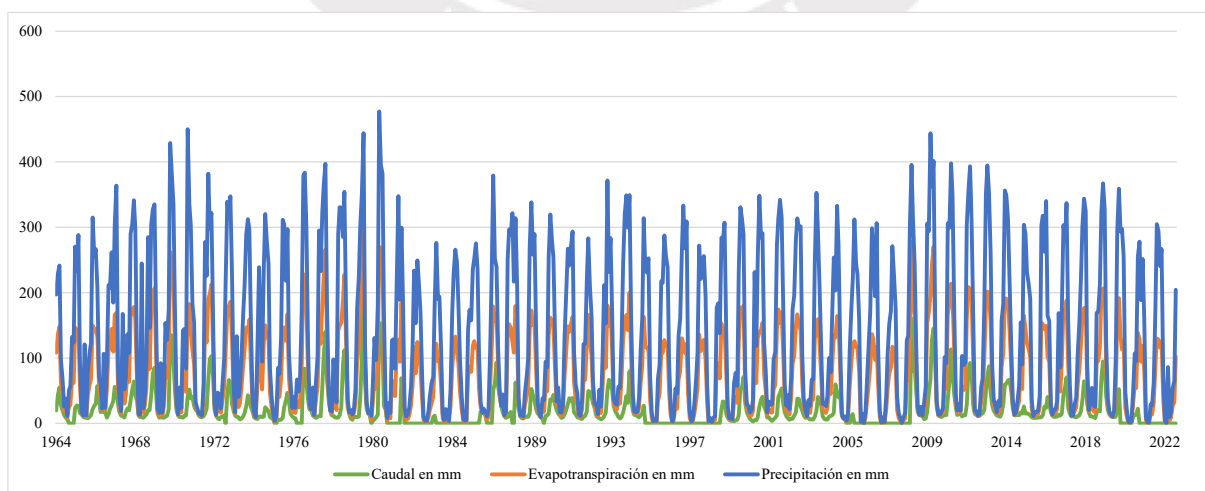


Figura 4.41 Gráfico de precipitación, evapotranspiración potencial y caudal (mm)

4.5 Periodos de Calibración y Validación

Para definirlos fue necesario observar la cantidad y distribución de información disponible del caudal observado en la estación hidrológica Pisac. Se advirtió que la información contenía datos faltantes “suelos” en ocho años y tres “lagunas” de varios años seguidos, como se puede observar en la siguiente figura:

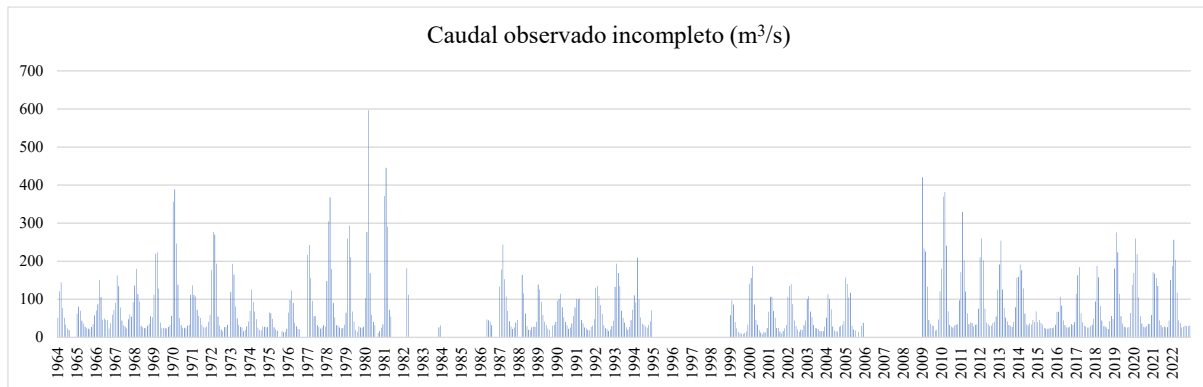


Figura 4.42 Caudales observados incompletos (m^3/s)

Debido a que no es recomendable completar “lagunas” de información, como las que se observan entre los años 1982-1986, 1995-1998, y 2006-2008, se definieron dos periodos de calibración, 1964-1980 y 1987-1994, y dos periodos de validación, 1999-2005 y 2009-2022. Se modeló en cada uno de los periodos de calibración por separado, y los parámetros obtenidos fueron evaluados en cada periodo de validación. Los parámetros de los modelos que mejor lograron reproducir los caudales observados fueron aquellos que condujeron a la mejor métrica NSE en ambas etapas; y, además, el NSE fuera similar en ambos periodos de validación. Por último, para llevar a cabo una adecuada modelación, se completaron los datos faltantes “suelos” con el promedio multianual del mes correspondiente.

Capítulo 5 Modelación Hidrológica

5.1 Modelo GR2M

5.1.1 Etapa de calibración.

Los insumos para la hoja de cálculo utilizada fueron: la precipitación, la ETP y el caudal observado, medidos en mm, correspondientes a los periodos 1964-1980 y 1987-1994. Las variables por optimizar consistieron en X_1 , la capacidad del Reservorio Suelo, medida en mm, y X_2 , el coeficiente de intercambio subterráneo. Adicionalmente, se escogieron valores convenientes de las variables S_0 y R_0 , niveles de llenado inicial de los Reservorios Suelo y Agua Gravitacional, respectivamente.

La hoja de cálculo utiliza el criterio de Nash-Sutcliffe como métrica predeterminada para medir la calidad del ajuste. X_1 y X_2 se determinaron con la función Objetivo en la celda donde se calcula la métrica NSE, haciendo que esta alcance el mayor valor posible. Luego, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 5.1 *Parámetros del modelo GR2M en la etapa de calibración del periodo 1964-1980*

	Transformado	Real
X_1 : Capacidad del Reservorio Suelo (mm)	6.95	1045.69
X_2 : Coeficiente de intercambio subterráneo	1.09	1.09

Nota. Los valores de la columna “Transformado” fueron aquellos que se optimizaron, mientras que los de la columna “Real” son los parámetros del modelo mencionados en el párrafo anterior. El valor “real” de X_1 consiste en el número e elevado por el “transformado”, y el valor “real” de X_2 es el mismo que el “transformado”.

Tabla 5.2 *Parámetros del modelo GR2M en la etapa de calibración del periodo 1987-1994*

	Transformado	Real
X_1 : Capacidad del Reservorio Suelo (mm)	6.71	819.78
X_2 : Coeficiente de intercambio subterráneo	1.03	1.03

Por otra parte, se determinó un Nivel de llenado inicial S_0 (máx. X_1 mm) de 300 mm y un Nivel de llenado inicial R_0 (máx. 60 mm) de 30 mm para ambos periodos. El valor del NSE fue 0.31, considerado insatisfactorio, para el primer periodo, y 0.84, considerado muy bueno,

para el segundo. La siguiente figura consiste en el hidrograma de caudales simulados y observados de cada periodo.

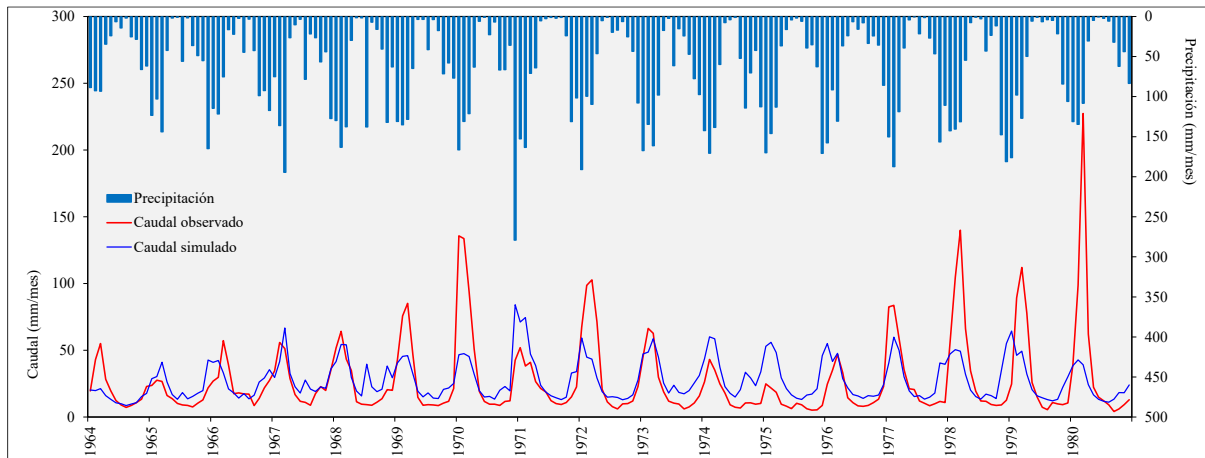


Figura 5.1 Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo GR2M

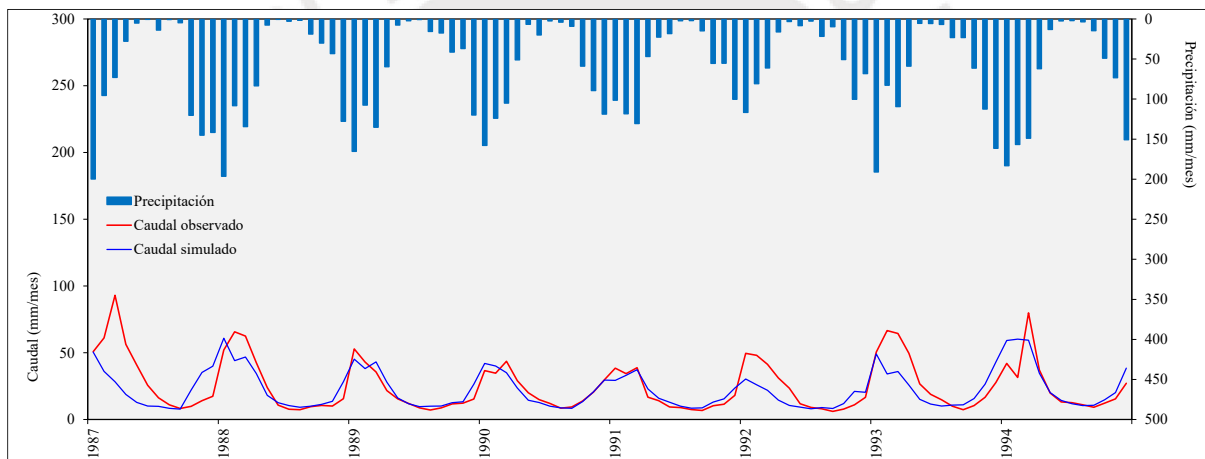


Figura 5.2 Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo GR2M

De la Figura 5.1 se aprecia que no se ha logrado una buena reproducción de los caudales observados, especialmente de aquellos mayores a los 100 mm/mes, lo cual pudo haber contribuido al NSE insatisfactorio. En cambio, de la Figura 5.2 se observa que se logró un mejor ajuste, lo cual pudo justificar el NSE muy bueno.

5.1.2 Etapa de validación.

5.1.2.1 validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980

Se utilizaron los mismos insumos que para la anterior etapa, esta vez correspondientes a los periodos 1999-2005 y 2009-2022. Se introdujeron los valores de X_1 y X_2 hallados

anteriormente en la etapa de calibración. Asimismo, fueron determinados unos S_0 y R_0 de 350 y 20 mm, respectivamente, para el periodo de validación 1999-2005; y 865 y 20 mm, para el periodo de validación 2009-2022. El valor del NSE fue 0.49, para el primer periodo, y 0.68, para el segundo. Luego, se obtuvieron los siguientes hidrogramas de caudales simulados y observados.

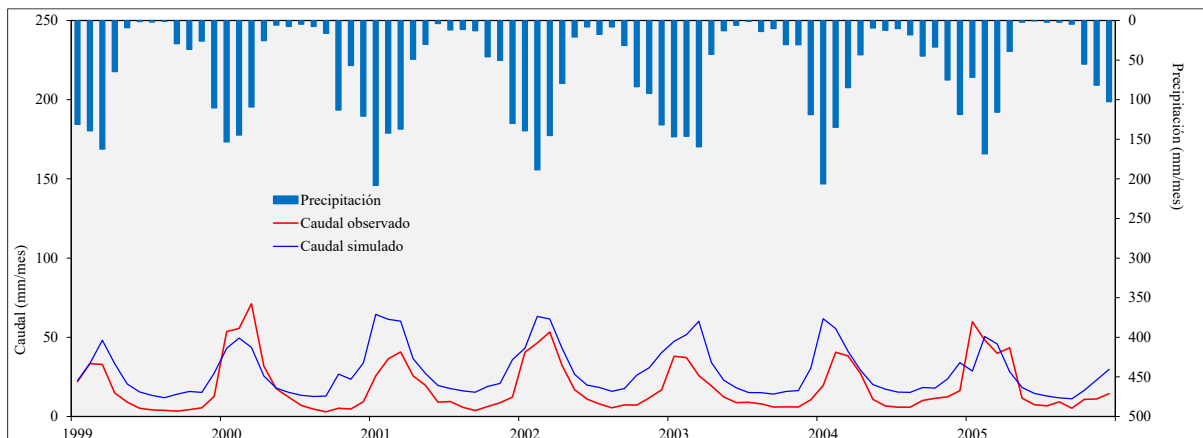


Figura 5.3 Hidrográfico de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo GR2M

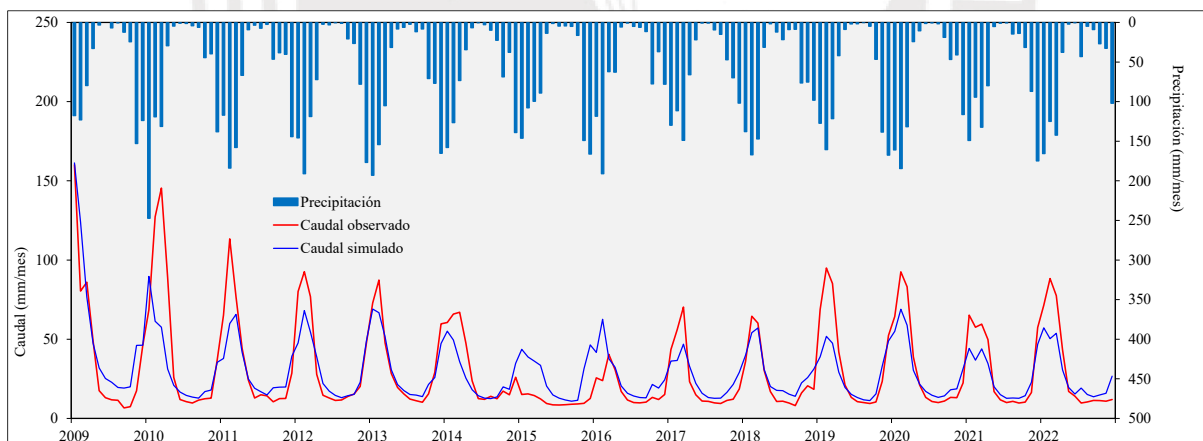


Figura 5.4 Hidrográfico de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo GR2M

En la Figura 5.3 la mayoría de los caudales simulados sobreestiman los caudales observados, dando la impresión de un desfase entre ellos. La forma del hidrográfico justifica el valor insatisfactorio de NSE de 0.49, según la Tabla 3.1. Por otro lado, de la Figura 5.4 se observa que los caudales simulados logran reproducir mejor a los observados, a excepción de

los caudales que superan los 70 mm/mes o 184 m³/s. Según el valor de NSE de 0.68, se considera que la performance del modelo en este caso fue buena.

En resumen, se tiene que la performance del modelo obtuvo un NSE de 0.31 en la etapa de calibración, con lo cual se consideró insatisfactoria, un NSE de 0.49 en el periodo de validación 1999-2005, con lo cual se consideró insatisfactoria también, y un NSE de 0.68 en el periodo de validación 2009-2022, con lo cual se consideró buena, a diferencia de las anteriores. Se tuvo precaución al declarar en general a la performance como buena, debido a que esta fue insatisfactoria en la calibración y obtuvo valores de NSE muy distintos en las etapas de validación.

5.1.2.2 validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994

Se introdujeron los valores de X_1 y X_2 hallados anteriormente en la etapa de calibración. Asimismo, se determinaron unos S_0 y R_0 de 170 y 35 mm, respectivamente, para el periodo de validación 1999-2005; y 725 y 30 mm, para el periodo de validación 2009-2022. El valor del NSE fue 0.65 para ambos periodos. Luego, se obtuvieron los siguientes hidrogramas de caudales simulados y observados.

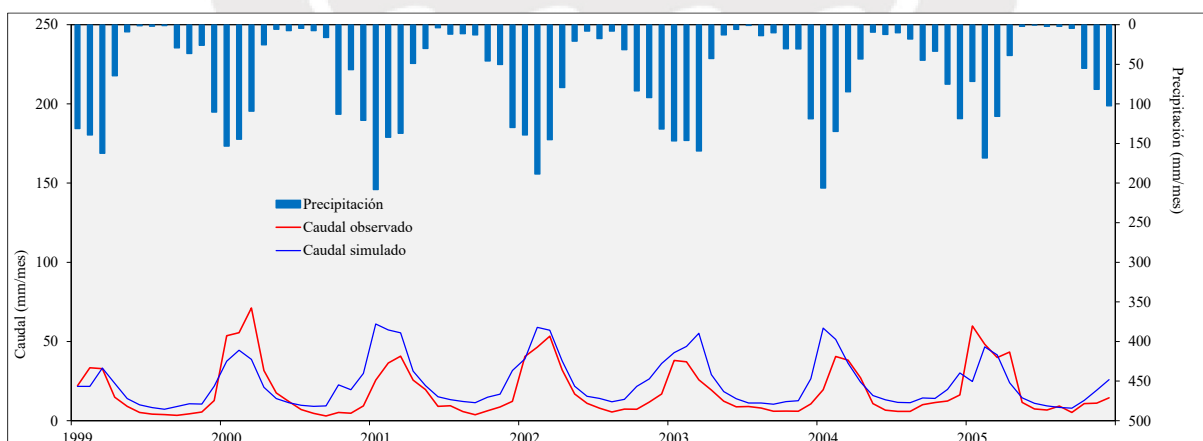


Figura 5.5 Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo GR2M

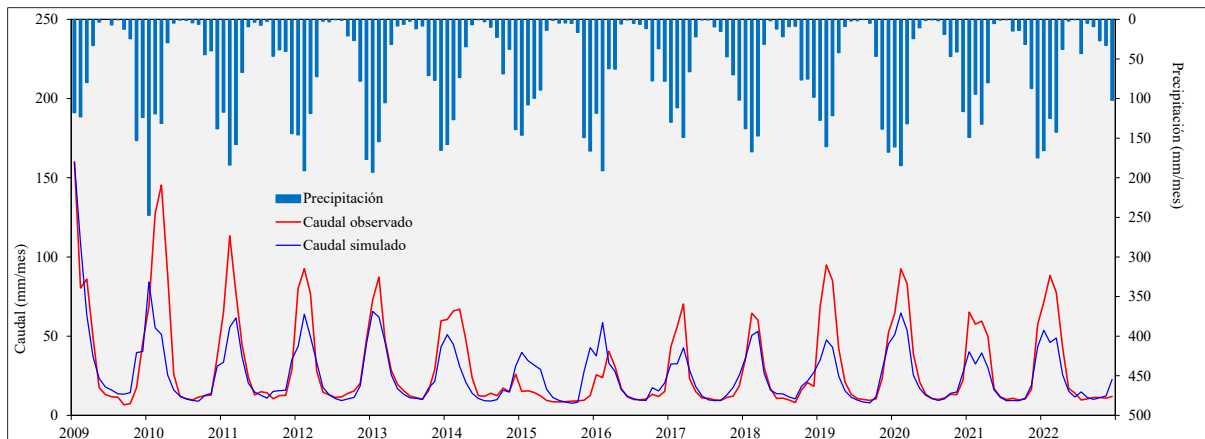


Figura 5.6 Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo GR2M

En la Figura 5.5, así como en la Figura 5.3, la mayoría de los caudales simulados sobreestiman los caudales observados aunque se aprecia un mejor ajuste. Ello se ve reflejado en el nuevo valor de NSE de 0.65, considerado satisfactorio. Por otro lado, en la Figura 5.6 se los caudales simulados logran reproducir mejor a los observados, a excepción de los caudales que superan los 70 mm/mes o 184 m³/s, como en la Figura 5.4. Según el valor de NSE de 0.65, la performance del modelo se ha mantenido satisfactoria.

En resumen, se tiene que la performance del modelo obtuvo un NSE de 0.84 durante la etapa de calibración, con lo cual se consideró buena, mientras que en el periodo de validación 1999–2005 obtuvo una performance con un NSE de 0.65, con lo cual se consideró satisfactoria, al igual que en el periodo de validación 2009-2022. Se decidió declarar en general a la performance en este caso como satisfactoria, debido a que esta fue buena en la calibración y obtuvo valores de NSE satisfactorios y consistentes en las etapas de validación.

5.1.3 Elección de los parámetros a escoger.

Se decidió escoger como parámetros del modelo a los obtenidos en la calibración del periodo 1987-1994, esto es, un X_1 de 819.78 mm y un X_2 de 1.03. Estos parámetros han demostrado un mejor ajuste en las etapas de calibración y validación a comparación de los obtenidos en el periodo 1964-1980.

5.2 Modelo Lutz-Scholz

5.2.1 Etapa de calibración.

La información proporcionada al software utilizado, HydroCALC 2.0.2, consistió en: la precipitación total mensual, la temperatura media anual y los caudales promedio mensuales aforados correspondientes a los periodos 1964-1980 y 1987-1994. En todas las modelaciones se colocó Cusco como la región hidrológica y un área de 7031.12 km². La temperatura promedio anual varió según el periodo a analizar. Los parámetros por optimizar fueron los siguientes: el gasto de la retención, R, el coeficiente de agotamiento, a, en función de R, y el coeficiente de escurrimiento C. Para todas las modelaciones se fijó el valor de R como 80 mm/año por la recomendación del antecedente 2.3.1 para la cuenca Vilcanota, por lo tanto, el coeficiente de agotamiento a se definió como mediano.

En el periodo 1964-1980 se introdujo una temperatura media anual de 11.3 °C y se calibró el valor de C en 0.31. Luego de introducir estos datos y la información correspondiente, se obtuvieron como resultados de los demás parámetros: un coeficiente de temperatura, L, de 300, una precipitación anual media; P, de 775 mm/año, y un déficit de escurrimiento, D, de 281.6 mm/año. Se obtuvo un NSE de 0.32, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el periodo 1987-1994 se introdujo una temperatura media anual de 11.5 °C y fue calibrado un de C en 0.36. Luego, se obtuvieron los demás parámetros: un coeficiente de temperatura, L, de 300, una precipitación anual media; P, de 774.3 mm/año, y un déficit de escurrimiento, D, de 281.6 mm/año. Se obtuvo un NSE de 0.30, considerado insatisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

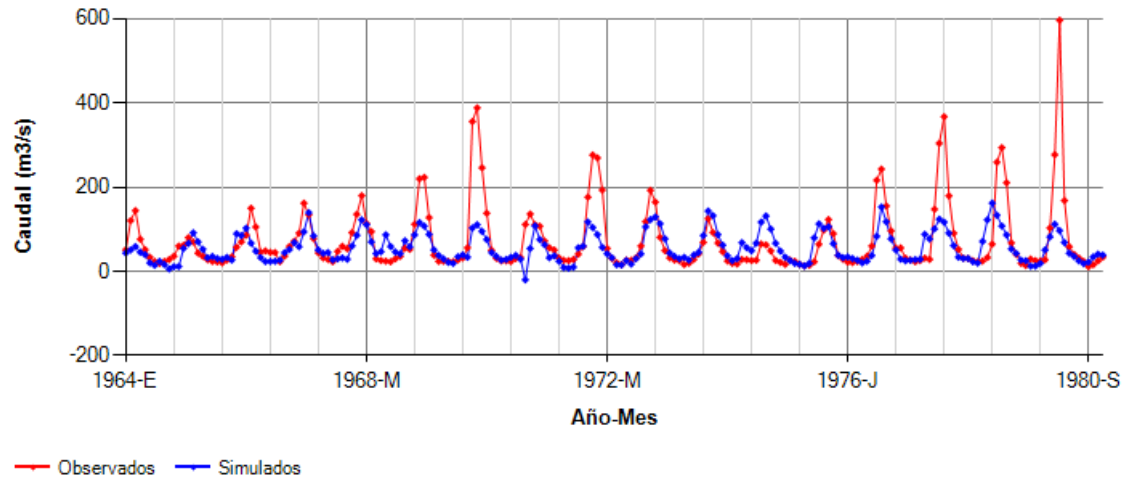


Figura 5.7 Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz

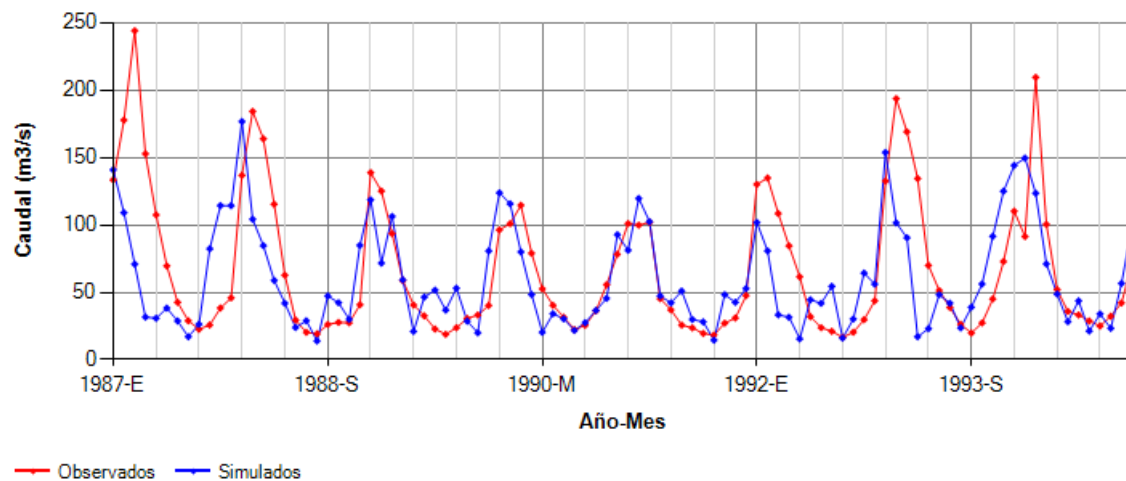


Figura 5.8 Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz

En la Figura 5.7 los caudales simulados replican a los observados aceptablemente fuera de los tiempos de avenidas, debido a que no reproducen los caudales mayores a los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. Por otro lado, en la Figura 5.8 el modelo no logra reproducir adecuadamente a los caudales observados, ni en las épocas de estiaje, mostrando incluso un comportamiento errático de incrementos y decrementos en las épocas de estiaje (o valores menores de $50 \text{ m}^3/\text{s}$), lo cual no sucedió en el modelo GR2M.

5.2.2 Etapa de validación.

5.2.2.1 validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980

Fueron utilizados los mismos insumos que para la anterior etapa, esta vez correspondientes a los periodos 1999-2005 y 2009-2022. Para el periodo 1999-2005 se introdujeron los valores de 11.4 °C de temperatura media anual y 0.31 de coeficiente de escurrimiento. Se obtuvieron como resultados de los demás parámetros: un L de 300, un P de 773.1 mm/año y un D de 281.6 mm/año. Se obtuvo un NSE de 0.50, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el periodo 2009-2022 se introdujeron los valores de 11.3 °C de temperatura media anual y el mismo coeficiente de escurrimiento. Se obtuvieron como resultados de los demás parámetros: un L de 300, un P de 758.6 mm/año y un D de 281.6 mm/año. Se obtuvo un NSE de 0.39, considerado insatisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

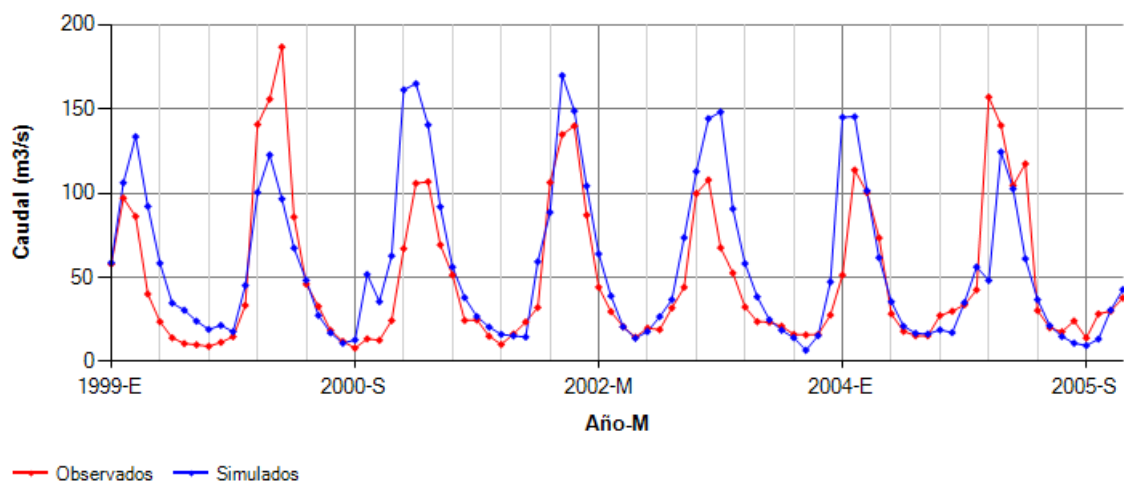


Figura 5.9 Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz

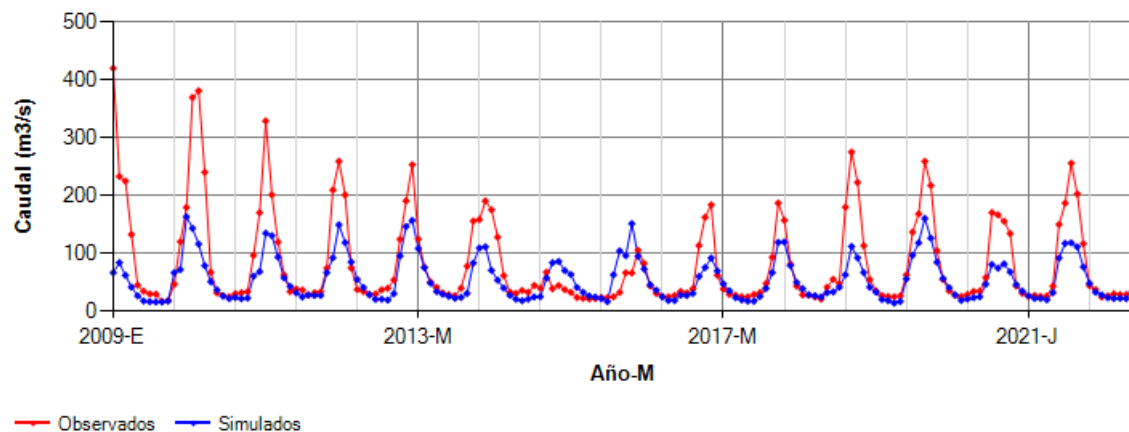


Figura 5.10 Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Lutz-Scholz

En la Figura 5.9 los caudales simulados reproducen de forma adecuada a los observados en los meses de estiaje en contraste con los meses de avenidas, donde el modelo, en ocasiones, sobreestima los valores (como entre los años 2000 y 2004) o los subestima considerablemente. Por otro lado, de la Figura 5.10 se observa que el ajuste es adecuado para caudales menores de 150 m³/s, a diferencia de para los caudales mayores de dicho valor. Las diferencias considerables entre los caudales simulados y observados pudieron haber llevado al valor insatisfactorio de NSE de 0.39.

En resumen, se tiene que la performance del modelo en la etapa de calibración obtuvo un NSE de 0.32, considerada insatisfactoria, mientras que en el periodo de validación 1999-2005, un NSE de 0.50, considerada insatisfactoria también, y un NSE de 0.39 en el periodo de validación 2009-2022, considerada igual que los anteriores. Se decidió declarar en general a la performance como insatisfactoria, debido a que esta lo fue en la calibración, al igual que en ambos periodos de validación, y obtuvo valores muy distintos de NSE entre estos dos periodos.

5.2.2.2 validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994

Se utilizaron los mismos insumos que para la anterior etapa, esta vez correspondientes a los periodos 1999-2005 y 2009-2022. Para el periodo 1999-2005 se introdujeron los valores de

11.4 °C de temperatura media anual y 0.36 de coeficiente de escurrimiento. Se obtuvieron los mismos resultados de los demás parámetros que en la sección 5.2.2.1. El NSE fue de 0.47, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el periodo 2009-2022 se introdujeron los valores de 11.3 °C de temperatura media anual y el mismo coeficiente de escurrimiento. Se obtuvieron los mismos resultados de los demás parámetros que en la sección 5.2.2.1. El NSE fue de 0.46, considerado insatisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

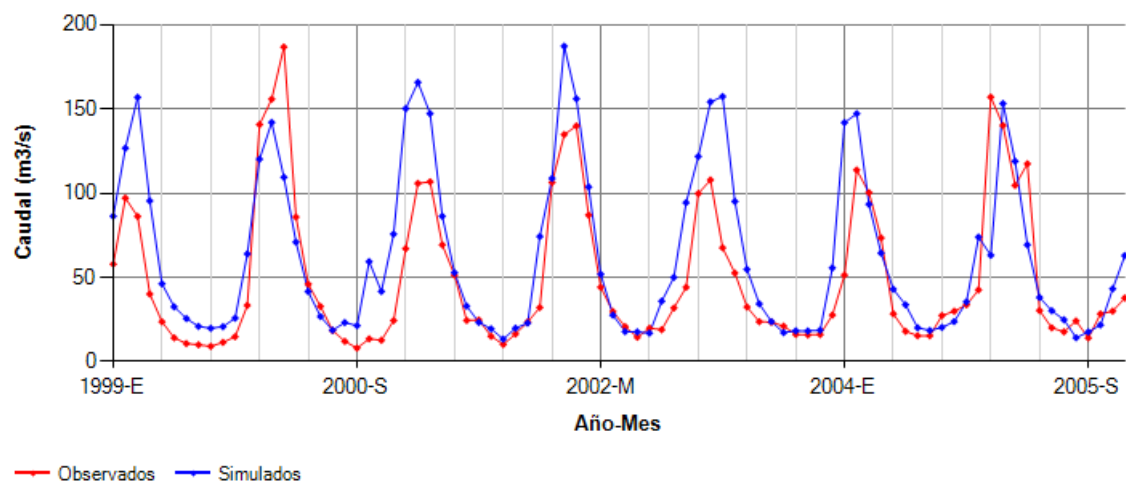


Figura 5.11 Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz

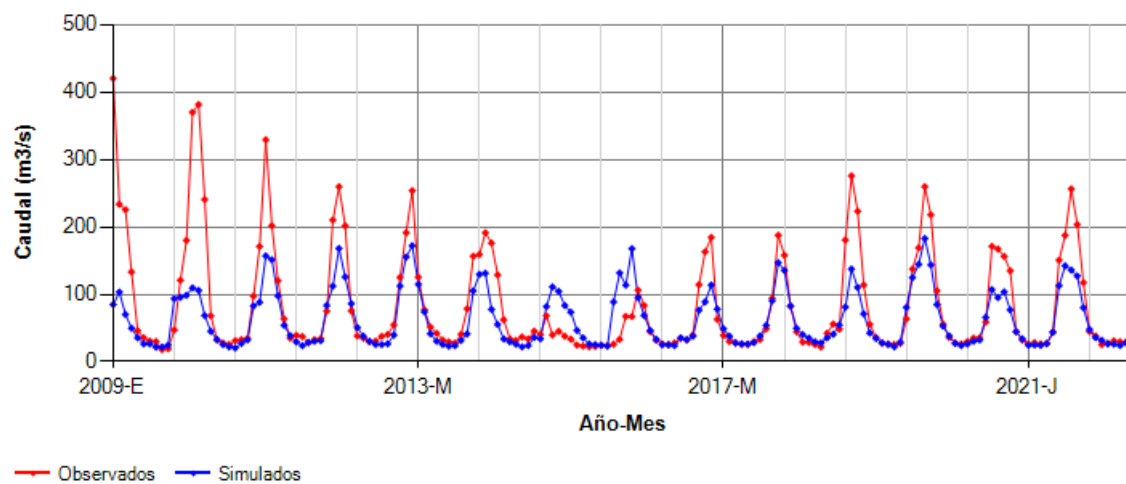


Figura 5.12 Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Lutz-Scholz

En la Figura 5.11 los caudales simulados reproducen de forma adecuada a los observados en las épocas de estiaje, así como en la Figura 5.9, aunque se puede notar una sobreestimación con respecto a la Figura 5.9. Por otro lado, de la Figura 5.12 se observa que el ajuste es adecuado para caudales menores a $150 \text{ m}^3/\text{s}$, así como en la Figura 5.10, además, se puede notar que la aproximación entre los caudales simulados y observados en épocas de avenidas mejora, lo cual pudo haber contribuido al mayor valor de NSE que en la Figura 5.10 (0.46 a comparación de 0.39).

En resumen, se tiene que la performance del modelo en la etapa de calibración obtuvo un NSE de 0.30, con lo cual fue considerada insatisfactoria, mientras que en el periodo de validación 1999-2005 obtuvo un NSE de 0.47, considerada insatisfactoria también, y un NSE de 0.46 en el periodo de validación 2009-2022, considerada igual que los anteriores. Se decidió declarar a la performance como insatisfactoria, debido a que fue insatisfactoria en la calibración, al igual que en ambos periodos de validación, aunque los valores NSE fueron prácticamente iguales entre estos dos periodos.

5.2.3 Elección de los parámetros a escoger.

Se decidió descartar al modelo como un método válido para el propósito del presente trabajo debido a la performance insatisfactoria en ambas etapas.

5.3 Modelo Témez

5.3.1 Etapa de calibración.

La información proporcionada al software utilizado, HydroCALC 2.0.2, consistió en la precipitación, la ETP, los caudales aforados para los periodos 1964-1980 y 1987-1994 y el área de la cuenca. Los valores a optimizarse fueron: el parámetro de excedencia, C , la humedad máxima, $H_{\text{máx}}$, la infiltración máxima, $I_{\text{máx}}$, y el coeficiente de descarga del acuífero, α . Además, se dieron valores para el caudal subterráneo inicial, Q_0 , y la humedad inicial, S_0 .

Para el periodo 1964-1980 se obtuvieron los siguientes valores: un C de 0.20, una $H_{\text{máx}}$ de 40 mm/mes, una $I_{\text{máx}}$ de 250 mm/mes, un α de 0.01 día^{-1} , un Q_0 de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ y un S_0 de 100 mm. Se tuvo un NSE de 0.35, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el periodo 1987-1994 se obtuvieron los siguientes valores: un C de 0.20, una $H_{\text{máx}}$ de 30 mm/mes, una $I_{\text{máx}}$ de 1100 mm/mes, un α de 0.01 día^{-1} , un Q_0 de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ y un S_0 de 60 mm. Se tuvo un NSE de 0.65, considerado satisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

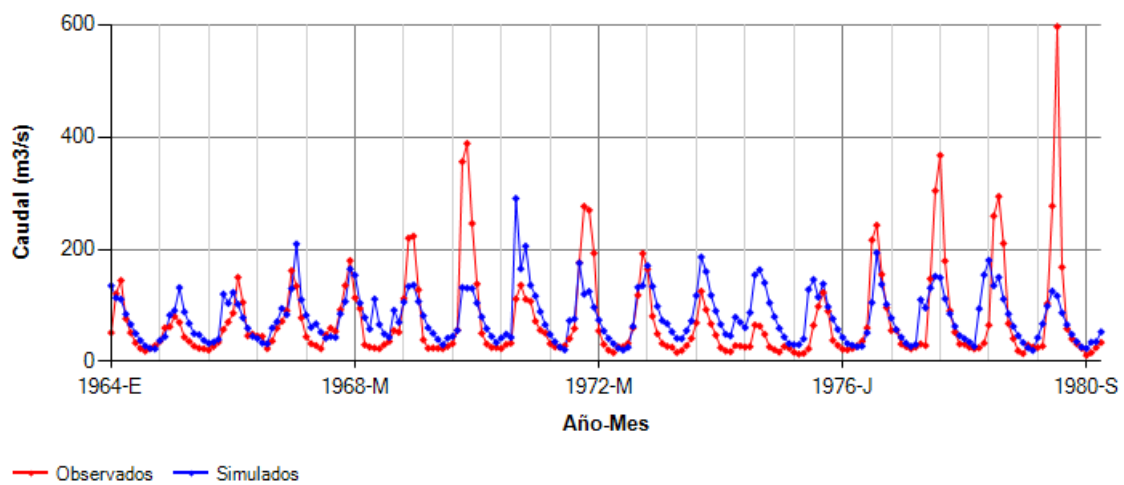


Figura 5.13 Hidrograma de la calibración del periodo 1964-1980 del modelo Témez

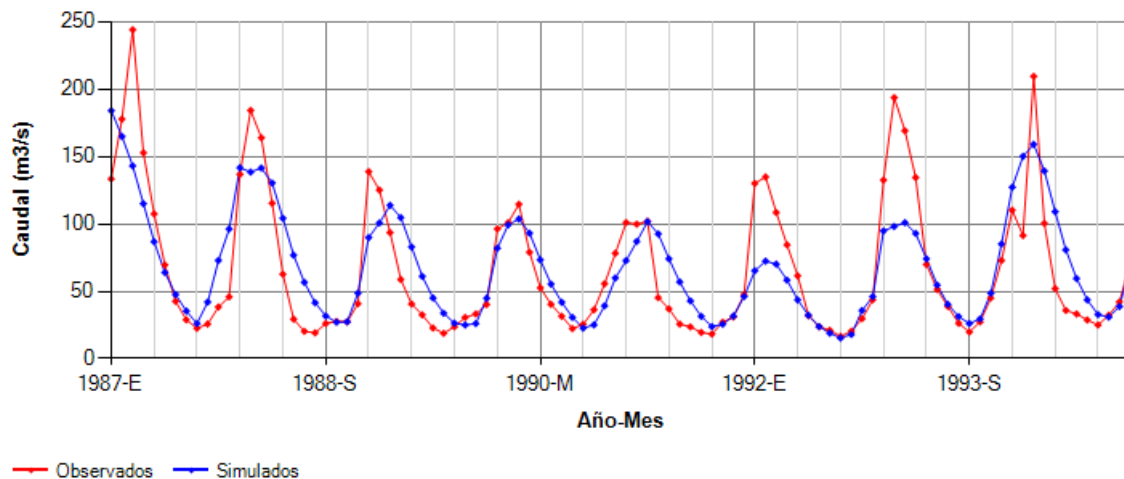


Figura 5.14 Hidrograma de la calibración del periodo 1987-1994 del modelo Témez

En la Figura 5.13 los caudales simulados no reproducen a los observados de forma adecuada, en algunos casos los sobreestiman, y, en otros, los subestiman. Generalmente no han reproducido valores mayores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, en la Figura 5.14 el modelo logra reproducir de mejor forma a los caudales observados que en la Figura 5.13, sin embargo, no logró reproducir adecuadamente los caudales de avenidas. Este mejor comportamiento se evidencia en el valor de NSE de 0.65.

5.3.2 Etapa de validación.

5.3.2.1 validación de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980

Fueron utilizados los mismos insumos que para la anterior etapa, esta vez correspondientes a los periodos 1999-2005 y 2009-2022. Para el periodo 1999-2005 se introdujeron los parámetros correspondientes en la sección 5.3.1 y se determinó un Q_0 de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y un S_0 de 5 mm . El NSE fue de 0, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el periodo 2009-2022, de igual forma, se introdujeron los parámetros correspondientes en la sección 5.3.1 y se determinó un Q_0 de $320 \text{ m}^3/\text{s}$ y un S_0 de 25 mm . El NSE fue de 0.67, considerado satisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

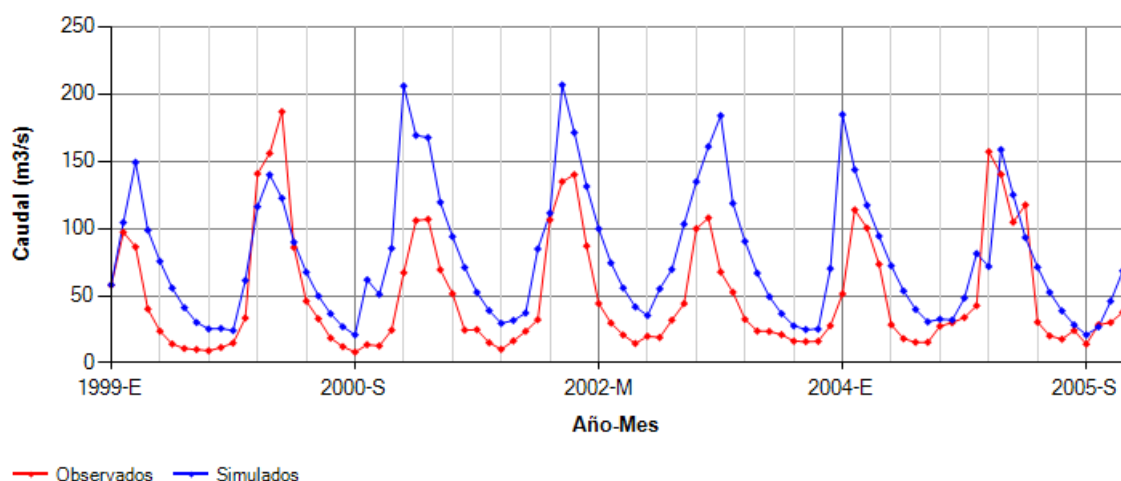


Figura 5.15 Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Témez

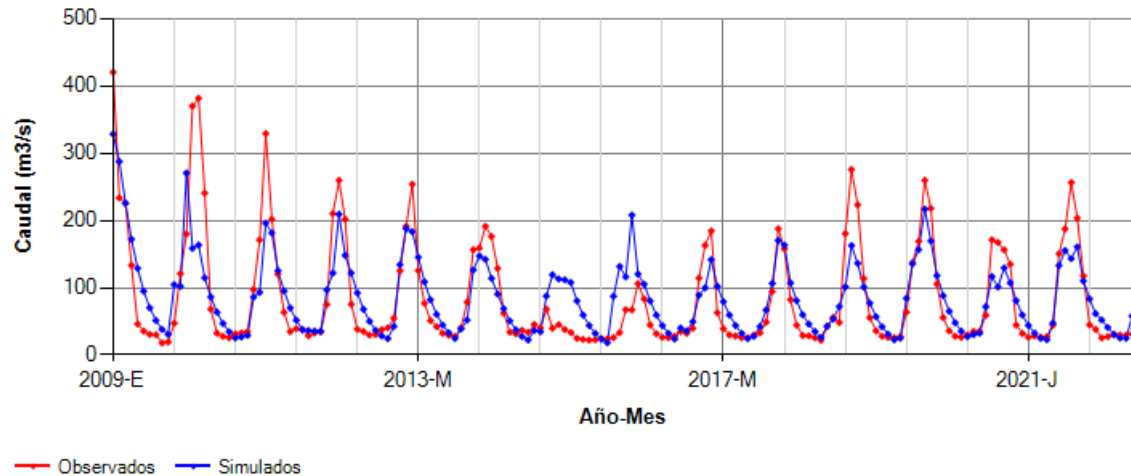


Figura 5.16 Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1964-1980 del modelo Témez

En la Figura 5.15 se observa que los caudales simulados no reproducen de forma adecuada a los observados de ninguna forma, dando la apariencia de un desfase entre ambos caudales. Ello podría justificar el valor de 0 de NSE. Por otro lado, de la Figura 5.16 se observa que el ajuste es adecuado para caudales menores de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Este mejor ajuste podría justificar el valor satisfactorio de NSE de 0.67.

En resumen, se tiene que en la etapa de calibración la performance del modelo obtuvo un NSE de 0.35, considerada insatisfactoria, mientras que en el periodo de validación 1999-2005 un NSE de 0, considerada insatisfactoria también, y un NSE de 0.67 en el periodo de validación 2009-2022, considerada satisfactoria. Se decidió declarar en general a la performance como insatisfactoria, debido a que esta lo fue en la calibración, al igual que en uno de los periodos de validación, y obtuvo valores muy distintos de NSE entre estos dos periodos.

5.3.2.2 validación de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994

Fueron utilizados los mismos insumos que para la anterior etapa, esta vez correspondientes a los periodos 1999-2005 y 2009-2022. Para el periodo 1999-2005 se introdujeron los parámetros correspondientes en la sección 5.3.1 y se determinó un Q_0 de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y un S_0 de 5 mm. El NSE fue de 0.32, considerado insatisfactorio. Por otro lado, para el

periodo 2009-2022, de igual forma, se introdujeron los parámetros correspondientes en la sección 5.3.1 y se determinó un Q_0 de 400 m³/s y un S_0 de 5 mm. El NSE fue de 0.55, considerado satisfactorio. Las siguientes figuras consisten en el hidrograma de caudales simulados y aforados de cada periodo.

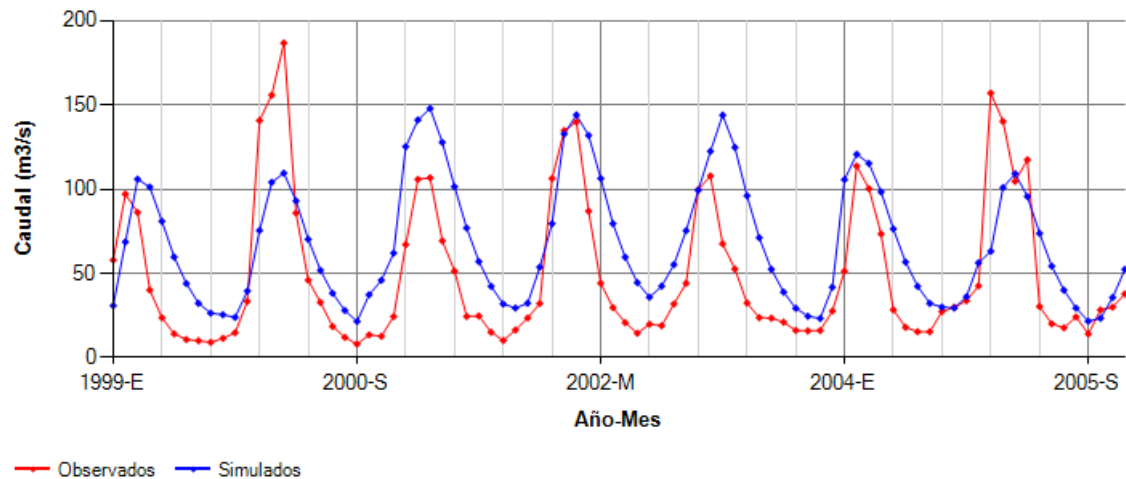


Figura 5.17 Hidrograma de la validación en el periodo 1999-2005 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Témex

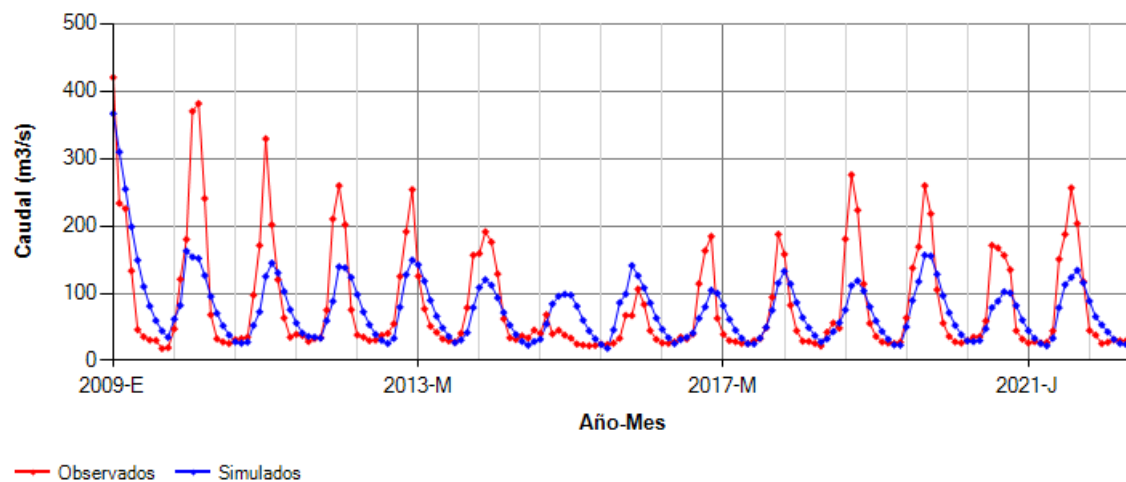


Figura 5.18 Hidrograma de la validación en el periodo 2009-2022 de los parámetros del periodo de calibración 1987-1994 del modelo Témex

En la Figura 5.17 se observa que los caudales simulados no reproducen de forma adecuada a los observados de ninguna forma, dando la apariencia de un desfase entre ambos caudales, así como en la Figura 5.15, aunque el ajuste parece haber mejorado un poco. Ello

podría justificar el NSE insatisfactorio de 0.32. Por otro lado, de la Figura 5.18 se observa que el ajuste es adecuado para caudales menores de 150 m³/s, a diferencia de para los caudales mayores de dicho valor. Se observa además que los caudales simulados han sido, en general, menores a los a la Figura 5.16. Esto podría justificar el decremento del NSE a 0.55.

En resumen, se tiene que la performance del modelo en la etapa de calibración obtuvo un NSE de 0.65, considerada satisfactoria, en el periodo de validación 1999-2005, un NSE de 0.32, considerada insatisfactoria, y en el periodo de validación 2009-2022, un NSE de 0.55, considerada satisfactoria. Se decidió declarar en general a la performance como no confiable, debido a que el modelo obtuvo valores distintos de NSE en los periodos de validación.

5.3.3 Elección de los parámetros a escoger.

Se decidió descartar al modelo como un método válido para el propósito del presente trabajo debido a la performance inconsistente en la etapa de validación.

5.4 Determinación del Modelo Más Representativo

En conclusión, luego de haber descartado a los modelos Lutz-Scholz y Témez y aprobado la performance del modelo GR2M en las etapas de calibración y validación del periodo 1987-1994, el modelo que mejor representa las condiciones hidrológicas de la cuenca Vilcanota-Písac es el modelo GR2M. La siguiente tabla resume todas las métricas resultado de la aplicación del modelo escogido. Para elaborar la tabla, se tomó al periodo 2009-2022 como el periodo de validación para hacer la comparación con la calibración.

Tabla 5.3 Resumen de las métricas obtenidas de la aplicación del modelo GR2M en el periodo 1987-1994

	Calibración	Validación
NSE	0.84	0.65
r	0.82	0.84
RMSE (m ³ /s)	13.65	17.64
R ²	0.52	0.69

Capítulo 6 Generación de Caudales Medios Mensuales

6.1 Precipitación Total Mensual para el Año Promedio

Fue calculada la precipitación total mensual promedio para cada mes del año.

Tabla 6.1 Precipitación Total Mensual para el Año Promedio (mm)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
151.5	132.7	121.2	49.1	9.1	3.6	13.1	8.8	22.9	50.8	76.1	122.4

6.2 Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio

Asimismo, fue calculada la evapotranspiración potencial mensual promedio.

Tabla 6.2 Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio (mm)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
123.1	109.0	108.4	49.1	9.1	3.6	12.4	8.8	22.9	50.8	74.7	112.2

A continuación, se muestra un gráfico comparativo entre los valores de la Precipitación Total Mensual y la Evapotranspiración Potencial para el Año Promedio.

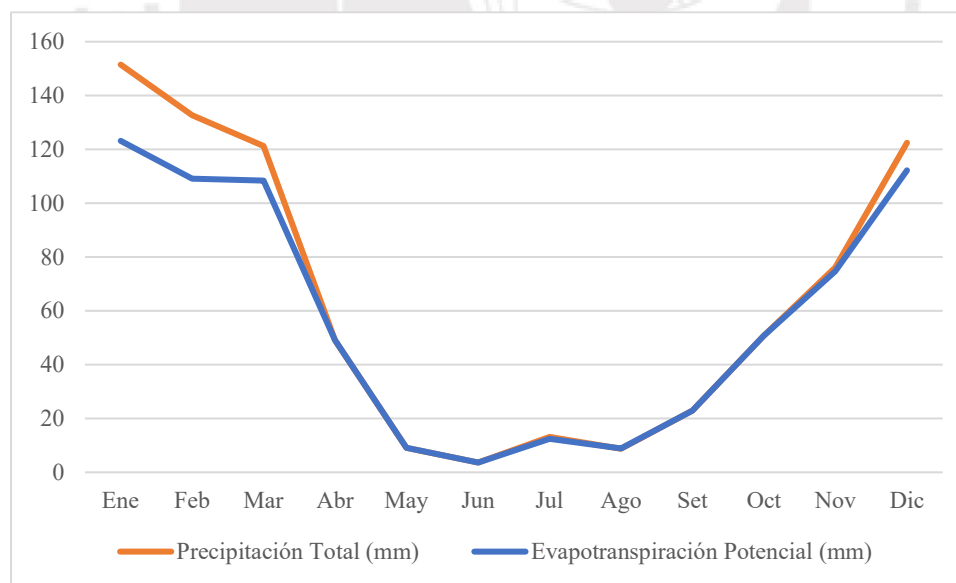


Figura 6.1 Gráfico de Evapotranspiración Potencial Mensual para el Año Promedio (mm)

Se puede observar que Enero, Febrero, Marzo y Diciembre son los únicos meses en los que la cantidad de precipitación total supera a la de la evapotranspiración potencial. Se podría teorizar que el método utilizado para calcular la evapotranspiración potencial, el de Hargreaves

y Samani, ha sobreestimado dicha variable. A diferencia de lo afirmado en el antecedente de la sección 2.3.3, la ETP no representa el 50% de la precipitación, al menos para esta porción de la cuenca.

6.3 Caudales Mensuales para el Año Promedio

Se utilizó el modelo hidrológico conceptual GR2M con el fin de calcular los caudales medios mensuales en el área de estudio. En este caso, se emplearon los datos climáticos mensuales promedio de precipitación y ETP, correspondientes a un año hidrológico típico (ver Tabla 6.1 y Tabla 6.2), con el objetivo de obtener un régimen de caudal medio mensual representativo.

Los parámetros del modelo (X_1 y X_2) de la Tabla 5.2 fueron utilizados, y para los niveles de llenado inicial se adoptaron los siguientes criterios. El almacenamiento inicial del reservorio de producción (S_0) se fijó como el 50% de su capacidad máxima ($S_0 = X_1/2$), lo que representa un estado intermedio razonable en ausencia de datos observados al inicio del periodo. Por otro lado, el nivel inicial del reservorio de transferencia (R_0) se fijó en cero ($R_0 = 0$), dado que este reservorio acumula agua progresivamente a lo largo del tiempo, y su influencia se estabiliza tras varias iteraciones del ciclo climático. Esta metodología garantiza que las condiciones iniciales no distorsionen los resultados finales, lo que permitió obtener estimaciones robustas de los caudales medios mensuales.

Luego, se obtuvieron los caudales medios mensuales en mm/mes, que se transformaron a m^3/s . La siguiente tabla muestra dichos caudales, mientras que la siguiente figura muestra el hidrograma correspondiente.

Tabla 6.3 Caudal Promedio Mensual para el Año Promedio (m^3/s)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
115.2	130.0	112.8	72.3	43.1	33.4	30.1	27.1	30.0	38.4	54.4	82.4

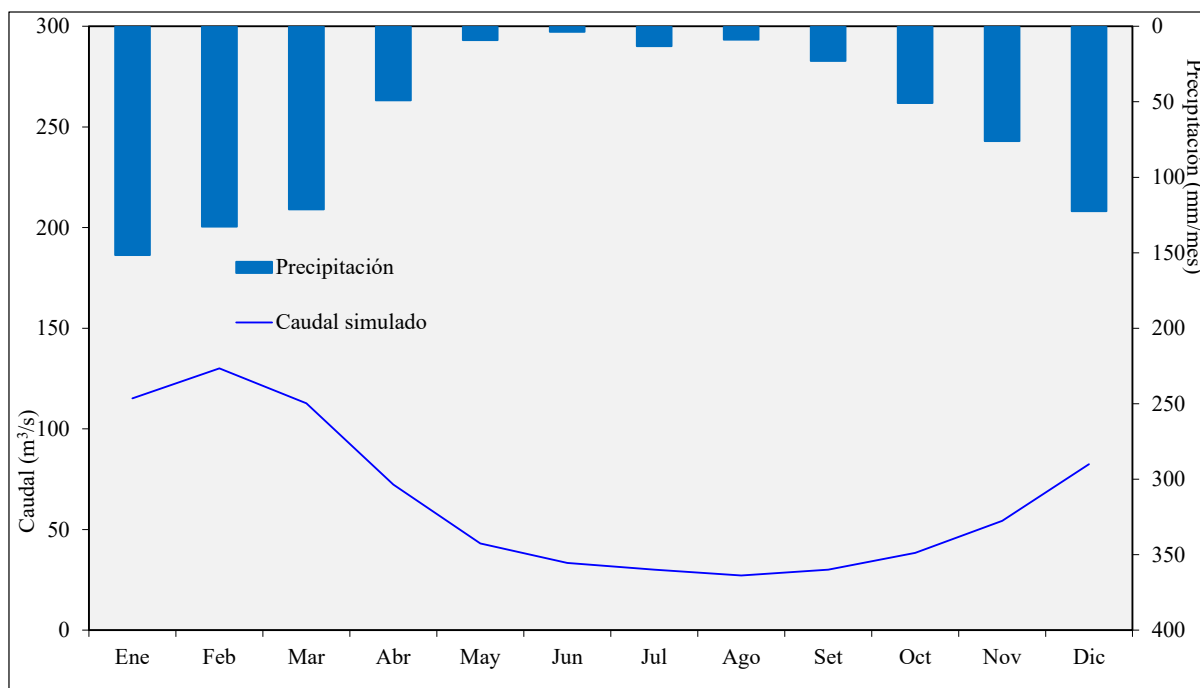


Figura 6.2 Hidrograma de Caudales Medios Mensuales para el Año Hidrológico Típico

Finalmente, los valores obtenidos con el modelo GR2M fueron comparados con los del antecedente en la sección 2.3.1 (ver Tabla 2.3). Se puede observar que se tiene una diferencia superior de 25% en relación al valor calculado en el antecedente en los meses de Febrero, Marzo, Octubre y Noviembre. Estos pertenecen a la época de avenidas, por lo que tiene sentido que el error sea mayor al tratarse de cantidades más altas de caudal. Además, el modelo GR2M subestimó los caudales en los meses de Febrero y Marzo y los sobreestimó en Octubre y Noviembre apreciablemente. No obstante, los valores calculados en Enero y Diciembre tuvieron diferencias menores al 8%, aun tratándose de meses de avenidas. Por otro lado, los demás meses, entre Abril y Setiembre, presentaron variaciones menores al 10%. A continuación, se incluye una tabla y un gráfico comparativos entre ambos caudales.

Tabla 6.4 Diferencias entre el Caudal Promedio Mensual del modelo GR2M y el antecedente (m^3/s)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Modelo GR2M	115.2	130.0	112.8	72.3	43.1	33.4	30.1	27.1	30.0	38.4	54.4	82.4
Antecedente	117.4	197	168.1	79.7	47	36.1	29.1	25.6	27.8	30.4	38.9	89.1
Diferencia (%)	-1.9%	-34.0%	-32.9%	-9.2%	-8.3%	-7.6%	3.4%	6.0%	8.1%	26.4%	39.8%	-7.5%
Diferencia (m^3/s)	-2.2	-67.0	-55.3	-7.4	-3.9	-2.7	1.0	1.5	2.2	8.0	15.5	-6.7

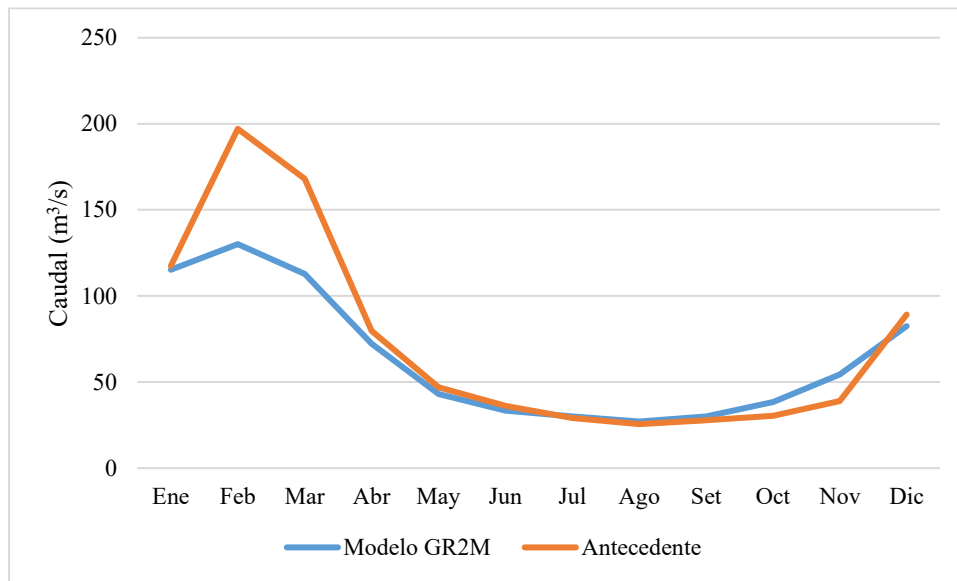


Figura 6.3 Gráfico comparativo de los Caudales Medios Mensuales calculados y aquellos provenientes del antecedente



Conclusiones

Acerca del tratamiento de la data hidrometeorológica

Con respecto al tratamiento de la data, el análisis de consistencia evidenció que la totalidad de las series hidrometeorológicas presentó algún tipo de inhomogeneidad, ya sea asociada a cambios bruscos (saltos) o a tendencias sistemáticas en la media y/o en la desviación estándar. Por consiguiente, fue necesario aplicar procedimientos de corrección específicos en cada caso, a fin de garantizar la homogeneidad temporal de la información antes de su utilización en los modelos hidrológicos. Asimismo, el procedimiento de completación mediante generación de números aleatorios mantuvo parámetros estadísticos similares a los de las series originales, lo que permitió extender la información sin alterar significativamente su estructura estadística.

En cuanto a la evapotranspiración potencial, el método de Hargreaves y Samani fue elegido por su simplicidad y baja exigencia de datos, sin embargo, se observó que este método tiende a sobreestimar los valores mensuales. En varios casos, la ETP calculada superó la precipitación total del mes, lo cual no es físicamente coherente en ecosistemas naturales, debido a que no puede evaporarse o transpirarse más agua de la que efectivamente ingresa al sistema. Ante esta situación, fue necesario corregir manualmente la ETP mensual igualándola al valor de la precipitación en aquellos meses donde la excedía, para mantener el balance hídrico dentro de límites razonables.

Este ajuste evidenció la sensibilidad del proceso de modelación frente a la calidad de la información de entrada. El que la evapotranspiración potencial producto de la aplicación del método de Hargreaves y Samani haya sobrepasado repetidamente la precipitación mensual, y que se haya tenido que corregir manualmente para mantener la coherencia física del balance hídrico, indica que este método tiende a sobreestimar los valores bajo ciertas condiciones climáticas de la cuenca. Por lo tanto, la precisión en la estimación de esta variable influye

directamente en la representación del comportamiento hidrológico mensual, y puede ser una fuente significativa de incertidumbre en los resultados.

De los parámetros y eficiencia de cada modelo hidrológico

Por otro lado, en conclusión, el modelo GR2M logra reproducir mejor el régimen hidrológico de la cuenca Vilcanota-Písac. Este representa de forma adecuada la variabilidad de los datos observados, se ajusta a estos de forma satisfactoria, y los resultados del modelo guardan una buena relación lineal con los datos observados. Sin embargo, se observa que no logra reproducir adecuadamente todos los caudales de avenidas, especialmente aquellos que fueron anormalmente altos, mayores a $184 \text{ m}^3/\text{s}$. Se resalta como ventaja del modelo que la calibración recae solo en dos parámetros, a diferencia de los demás modelos, lo cual facilita y acelera el proceso de calibración. Por otro lado, se evidenció que, en la etapa de validación del modelo, la calidad del ajuste, representada principalmente por el NSE, bajó con respecto al que se tenía en la calibración, de 0.84 a 0.65, aunque aún se considera una performance satisfactoria. Asimismo, el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), y el Coeficiente de Determinación (R^2) mejoraron, contrariamente a lo que suele pasar al validar a los parámetros en otro periodo, mientras que el Error Cuadrático Medio (RMSE) se elevó.

Con respecto al modelo Lutz-Scholz, este no logra reproducir de forma adecuada los caudales observados en la etapa de calibración, especialmente aquellos mayores a los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. Sin embargo, en la etapa de validación, en las épocas de estiaje, los caudales simulados reproducen más adecuadamente los observados, a diferencia de los caudales mayores $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Al contrario del modelo GR2M, en la etapa de validación el modelo Lutz-Scholz obtuvo mejores valores de NSE a comparación de la de calibración; aun así, no se obtuvo una performance satisfactoria en ninguna etapa, por lo que el modelo fue descartado. Asimismo, durante el proceso de calibración del modelo Lutz-Scholz se descubrió que, el componente estocástico del modelo, el cual hace que en cada modelación la serie de caudales

generados sea distinta a la anterior, puede alterar apreciablemente la calidad del ajuste hasta cierto punto. Es por ello que se hicieron varias modelaciones hasta lograr el mejor NSE posible.

Finalmente, en el caso del modelo Témez, los caudales simulados en la etapa de calibración del periodo 1964-1980 no reprodujeron a los observados de forma adecuada, mientras que en el periodo 1987-1994 el ajuste mejoró, aunque no logró reproducir los caudales pertenecientes a las épocas de avenidas. En la etapa de validación de ambos periodos se obtuvieron valores de NSE muy distintos, y solo en un caso la performance fue satisfactoria. Debido a la falta de consistencia en la performance entre las etapas de calibración y validación, el modelo fue descartado.

De los caudales medios mensuales resultantes

Se obtuvieron valores muy similares a los del antecedente del año 1980, excepto en los siguientes meses de avenidas: Febrero, Marzo y Noviembre. Las diferencias entre los caudales obtenidos en el presente trabajo y en dicho antecedente en dichos meses fluctúan entre los 15.5 a 67 m³/s, donde Febrero y Marzo fueron los meses con mayores diferencias. En el caso del mes de Noviembre, el modelo GR2M estimó un caudal superior al del antecedente, y, con respecto a Febrero y Marzo, estimó caudales inferiores.

Recomendaciones

Antes de iniciar el análisis de la información, resulta conveniente evaluar la incorporación de datos provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas externas al área en análisis. Esto se justifica particularmente en zonas altoandinas, donde la cobertura de estaciones meteorológicas es escasa o inexistente. Incluir estaciones cercanas, aunque estén fuera de los límites hidrográficos, puede mejorar significativamente la caracterización espacial de las variables climáticas, especialmente cuando no hay alternativas locales confiables.

Durante el cálculo de variables medio areales en cuencas con marcada heterogeneidad climática y orográfica, se sugiere emplear métodos de interpolación espacial que consideren explícitamente estos factores. Técnicas como Kriging con ponderación por altitud, regresión con covariables topográficas o el uso de modelos digitales de elevación pueden mejorar la representación espacial de estas variables. Esto es fundamental para reflejar la variabilidad climática real dentro de la cuenca, dado que parámetros como la altitud influyen directamente en la caracterización de precipitación y temperatura.

Con respecto a la calibración de los caudales mensuales, se recomienda trabajar con series históricas superiores a diez años. Un mayor periodo de calibración contribuye a incrementar la robustez de los parámetros ajustados y, en consecuencia, la confiabilidad del modelo durante la etapa de validación. Es importante reconocer que, usualmente, el desempeño del modelo en la calibración disminuye en la validación, debido a que el modelo fue ajustado de cierta forma con el fin de reproducir un conjunto específico de datos a partir de datos de entrada específicos. Por ello, contar con una base de datos amplia y representativa resulta esencial para aumentar la generalización y confiabilidad del modelo.

Asimismo, se sugiere contrastar los métodos utilizados para estimar la evapotranspiración potencial, especialmente en regiones donde los datos meteorológicos disponibles son limitados. Métodos como Hargreaves y Samani, aunque útiles por su

simplicidad, pueden sobreestimar la evapotranspiración en ciertas condiciones climáticas. Sería recomendable comparar estos resultados con estimaciones obtenidas a partir de métodos más completos, como Penman-Monteith, cuando se disponga de los datos necesarios (temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento).

Finalmente, se recomienda establecer redes de monitoreo más densas en las cuencas de montaña, priorizando las zonas más elevadas y alejadas. Esto permitirá no solo una mejor estimación de las variables climáticas, sino también una modelación hidrológica más precisa, especialmente en contextos de cambio climático.



Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. FAO. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>
- ANA. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la Cuenca de Urubamba*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/54>
- ANA. (2015). *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*. <https://www.ana.gob.pe/media/2801/plan-nacional-de-recursos-hidricos-del-peru.pdf>
- ANA. (2019). *Ámbito*. <https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/urubamba/%C3%81mbito>
- ANA. (2019). *Hidrografía*. <https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/urubamba/Hidrograf%C3%ADa>
- ANA. (s.f.). *Observatorio del Agua - ANA*. Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>
- ANA. (s.f.). *Cantidad disponible de agua – Cuenca Urubamba*. <https://crhc.ana.gob.pe/urubamba/ambito-de-gestion/cantidad-disponible-de-agua>
- Avalos, G. (2009). Evaluación del modelo Eta/SENAMHI en la previsión de la precipitación durante los periodos lluviosos 2002 y 2003. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, (1), 108-124.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Cubasch, U., Waszkewitz, J., Hegerl, G. et al. (1995). Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climatic Change* 31, 273–304. <https://doi.org/10.1007/BF01095150>

- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., Oré, M. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2, 715-733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., Frey, H., Vicuña, L., & Buytaert, W. (2023). *Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibinacocha, Southern Peru*. *Science of the Total Environment*, 858, 159821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159821>
- Fernandez-Palomino, C., Hattermann, F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., Bronstert, A. (2020). Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1846740>
- Llauca, H., Arestegui, M., & Lavado-Casimiro, W. (2023). *Constraining flood forecasting uncertainties through streamflow data assimilation in the Tropical Andes of Peru: Case of the Vilcanota River Basin*. *Water*, 15(22), 3944. <https://doi.org/10.3390/w15223944>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., Rau, P. (2021). PISCO_HyM_GR2M: A Model of Monthly Water Balance in Peru (1981-2020). *Water*, 13(1048). <https://doi.org/10.3390/w13081048>

- Lujano, A., Sanchez-Delgado, M., & Lujano, E. (2023). *Improvement of Hargreaves–Samani reference evapotranspiration estimates in the Peruvian Altiplano*. *Water*, 15(7), 1410. <https://doi.org/10.3390/w15071410>
- Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2013). *Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale: A review*. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17(2), 392–406. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=10003>
- MINAM. (s.f.). *Información disponible vectorial*. Geoservidor Perú. <https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>
- Montealegre, J. (1990). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. HIMAT.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- MTC. (2015). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models: Part I — A discussion of principles*. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque-Sendra, J., Sastre-Merlin, A., Ponce, M. (2016). Calibración, validación y evaluación de un modelo hidrológico concentrado en un área montañosa al sur del Ecuador. *Agrociencia*, 50, 945-963.
- Plan Meriss II. (1980). *Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/279900554/PDF-Generacion-de-Caudales-Mensuales-en-La-Sierra-Peruana-Meriss-II>

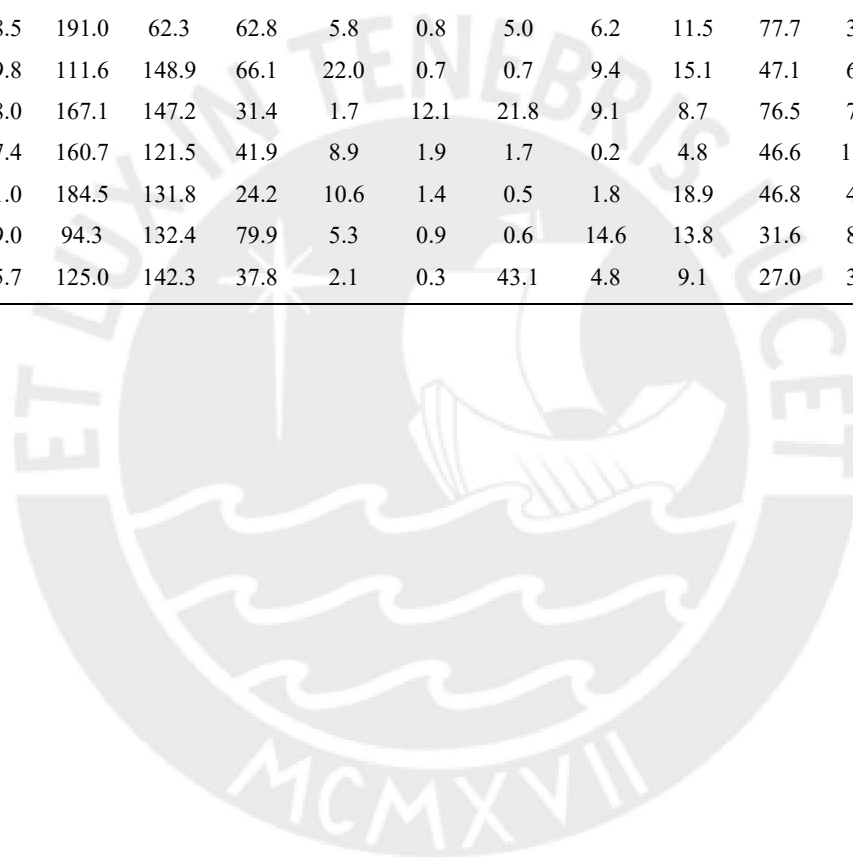
- Razad, A., Sidek, L., Jung, K. et al. (2018). Reservoir inflow simulation using MIKE NAM rainfall-runoff model: Case study of Cameron highlands. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(12), 4206-4225.
- SENAMHI. (2007). *Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Urubamba para el año 2100*. Recuperado de https://www.senamhi.gob.pe/usr/cmn/pdf/PRAA_est_fin_cuenca_URUBAMBA.pdf
- SENAMHI. (2012). *Uso de precipitación estimada por satélite TRMM en la modelización hidrológica de la cuenca del río Vilcanota*. Recuperado de https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/2140/Uso-de-precipitaci%C3%B3n-estimada-por-sat%C3%A9lite-TRMM-en-la-modelizaci%C3%B3n-hidrol%C3%B3gica-de-la-cuenca-del-r%C3%ADo-Vilcanota_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Témez, J. R. (1977). *Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica.
- Terán, C. (s.f.). *"Hidrología aplicada"* [PDF]. LARAMA INGENIEROS S.R.L.
- Villón, M. (2006). *Hidrología Estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Anexos

Anexo A. Tabla de Precipitación Total Mensual media areal

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	88.7	92.7	93.2	34.5	24.0	6.6	14.4	2.0	25.3	28.4	66.1	61.9
1965	123.4	102.9	143.9	42.3	2.0	0.8	55.9	1.8	36.2	48.8	55.1	165.0
1966	114.6	121.7	75.3	16.4	22.1	2.4	44.6	3.3	42.5	98.8	92.5	117.2
1967	75.1	136.1	194.6	26.6	10.4	3.4	78.3	21.7	26.5	56.7	44.0	127.3
1968	129.8	163.2	137.7	29.7	1.5	1.8	137.9	7.1	16.1	40.7	132.2	62.9
1969	131.0	135.2	128.3	64.8	3.6	3.6	41.5	3.8	17.5	71.6	57.9	76.8
1970	166.4	131.1	121.2	63.2	5.9	1.0	22.7	6.9	66.8	66.3	35.8	279.1
1971	152.7	163.5	70.9	64.1	5.4	2.7	1.2	2.1	1.2	24.1	131.2	101.6
1972	191.0	99.6	109.7	46.4	5.1	0.9	19.6	17.0	6.4	25.4	43.5	107.9
1973	167.5	134.7	161.4	98.1	17.4	2.4	61.5	15.3	24.2	47.1	77.7	97.5
1974	142.5	170.6	138.5	59.9	7.6	4.0	1.1	52.3	114.2	70.4	42.4	112.8
1975	170.1	146.0	113.0	36.7	16.3	4.3	2.0	5.9	39.4	35.3	62.7	170.9
1976	157.8	91.6	130.6	36.7	24.1	6.5	15.9	7.8	33.6	24.3	35.6	85.8
1977	150.3	187.5	118.9	39.4	4.2	0.5	21.5	1.3	27.0	46.6	156.6	110.8
1978	142.6	140.6	131.4	54.6	7.7	0.7	2.9	43.1	23.5	11.6	147.6	181.2
1979	176.2	98.0	127.1	49.8	5.8	0.9	6.6	4.0	4.8	21.5	84.3	106.1
1980	131.2	134.7	108.3	30.5	4.8	0.5	2.3	5.7	32.0	62.2	43.8	83.6
1981	206.6	127.8	143.2	69.2	5.8	4.2	15.6	7.9	63.5	64.3	41.9	109.4
1982	219.7	94.5	115.2	67.9	12.1	5.3	7.1	12.5	27.8	58.9	116.8	76.6
1983	124.7	108.2	85.4	37.3	4.7	2.1	2.0	9.7	21.4	30.8	30.7	84.9
1984	154.6	95.2	96.9	57.0	7.4	2.4	11.0	4.8	1.9	26.1	84.2	114.4
1985	132.9	135.8	91.8	47.7	21.0	3.2	2.1	2.5	71.8	86.8	78.8	117.9
1986	125.9	159.9	117.7	53.1	7.3	0.1	3.3	2.5	5.4	10.5	55.3	118.2
1987	199.9	95.6	73.1	27.9	5.1	0.6	14.0	0.7	4.8	120.4	145.1	141.6
1988	196.4	108.4	134.5	83.6	7.6	0.6	2.8	1.7	18.9	30.1	43.4	127.7
1989	165.4	107.5	135.3	59.8	7.6	2.4	0.7	15.6	17.6	41.4	37.0	119.9
1990	157.9	123.9	105.0	51.2	6.7	20.1	2.6	4.0	9.1	58.9	89.4	118.8
1991	101.5	118.5	130.6	46.9	22.7	18.3	2.3	2.1	14.9	55.6	55.3	100.3
1992	116.7	80.9	61.2	16.2	3.2	8.4	2.7	21.7	9.8	50.8	100.3	68.2
1993	191.1	82.7	109.5	58.9	5.5	5.7	6.8	23.2	23.2	61.5	112.6	161.6
1994	183.2	156.7	149.0	62.2	13.2	2.6	2.1	3.7	14.7	49.0	73.5	150.9
1995	117.0	115.4	139.3	35.7	8.0	1.6	3.5	1.8	34.3	44.9	108.8	107.6
1996	160.0	137.2	119.3	48.0	11.1	1.4	5.7	26.7	22.7	66.9	80.3	132.7
1997	210.7	159.8	187.3	46.2	8.5	1.3	3.2	15.9	33.7	53.9	136.0	110.5
1998	125.2	128.2	97.1	28.5	1.5	4.0	1.1	4.4	5.6	88.6	91.8	68.9
1999	131.2	139.3	162.3	64.6	9.0	1.4	1.9	1.1	29.2	36.5	26.0	110.4
2000	153.3	144.6	109.2	25.4	5.8	7.5	4.7	7.6	16.2	113.1	56.8	120.8
2001	208.2	142.2	137.2	48.9	30.0	3.9	11.9	11.4	12.9	45.9	50.2	129.9
2002	139.2	188.6	145.3	79.4	20.9	8.0	17.5	8.0	31.5	83.5	92.1	131.7
2003	146.8	146.2	159.4	42.8	13.0	6.0	1.0	13.8	10.3	30.4	30.6	118.9

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2004	206.2	134.9	84.8	43.3	9.5	12.3	10.2	18.1	44.9	33.5	75.2	118.7
2005	71.7	168.4	115.7	38.9	2.1	0.2	2.1	2.1	4.6	55.1	81.6	102.5
2006	186.2	127.0	113.5	79.3	1.2	7.3	0.0	9.7	32.9	59.1	86.6	161.7
2007	128.9	97.3	189.5	58.9	9.1	0.5	4.6	0.9	19.9	52.4	76.2	86.0
2008	153.7	113.4	88.3	20.8	7.8	4.0	0.3	4.7	7.8	63.6	67.2	169.1
2009	117.7	123.1	79.7	33.0	3.3	0.0	6.9	0.5	12.3	24.5	153.0	123.8
2010	247.4	119.3	131.4	29.5	4.6	1.0	1.3	4.2	6.2	44.5	39.7	138.1
2011	117.2	184.0	158.0	66.9	9.2	3.5	7.3	2.6	46.4	38.4	40.2	144.3
2012	145.8	191.1	118.8	72.3	2.3	3.1	0.4	1.2	20.8	26.5	78.1	176.8
2013	192.9	154.2	105.1	31.6	8.2	6.1	2.3	11.7	8.3	70.9	76.9	165.3
2014	157.9	126.5	73.3	34.5	6.8	0.4	2.8	9.8	22.5	68.7	37.7	139.0
2015	146.1	107.9	99.6	89.2	13.7	1.3	4.6	4.4	5.0	16.3	149.0	166.3
2016	118.5	191.0	62.3	62.8	5.8	0.8	5.0	6.2	11.5	77.7	36.9	78.0
2017	129.8	111.6	148.9	66.1	22.0	0.7	0.7	9.4	15.1	47.1	69.9	101.9
2018	138.0	167.1	147.2	31.4	1.7	12.1	21.8	9.1	8.7	76.5	75.3	98.2
2019	127.4	160.7	121.5	41.9	8.9	1.9	1.7	0.2	4.8	46.6	138.5	167.5
2020	161.0	184.5	131.8	24.2	10.6	1.4	0.5	1.8	18.9	46.8	41.0	116.3
2021	149.0	94.3	132.4	79.9	5.3	0.9	0.6	14.6	13.8	31.6	87.1	174.9
2022	165.7	125.0	142.3	37.8	2.1	0.3	43.1	4.8	9.1	27.0	32.7	102.1



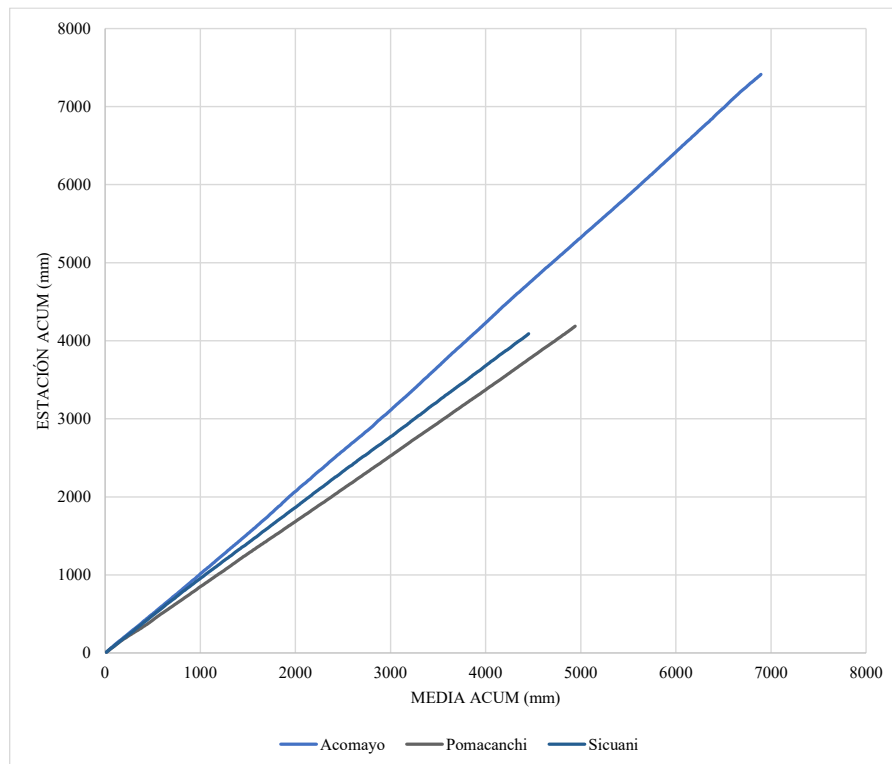
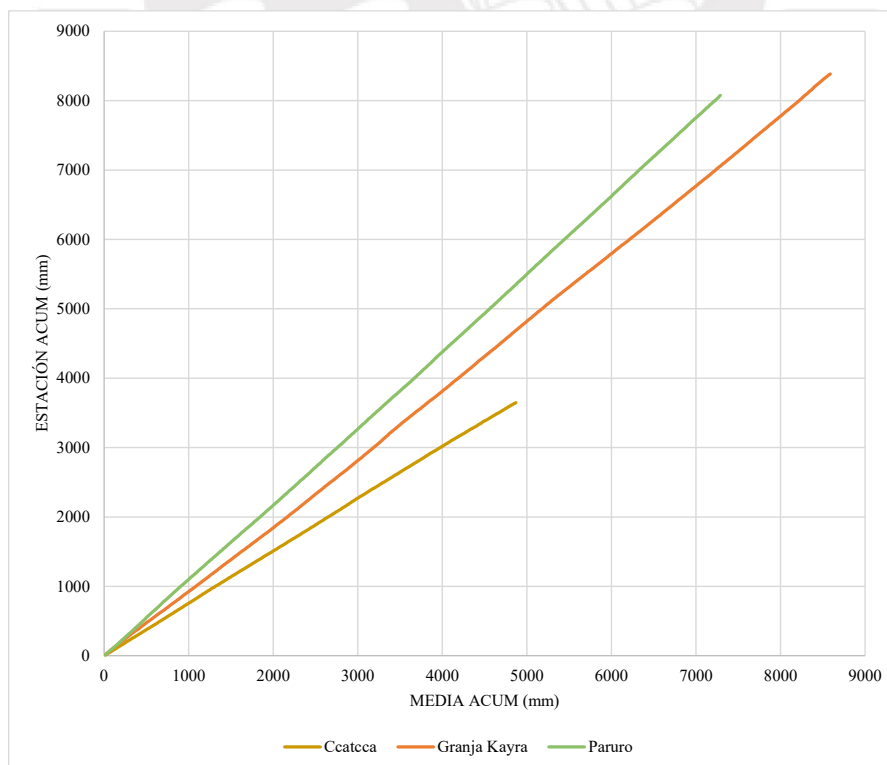
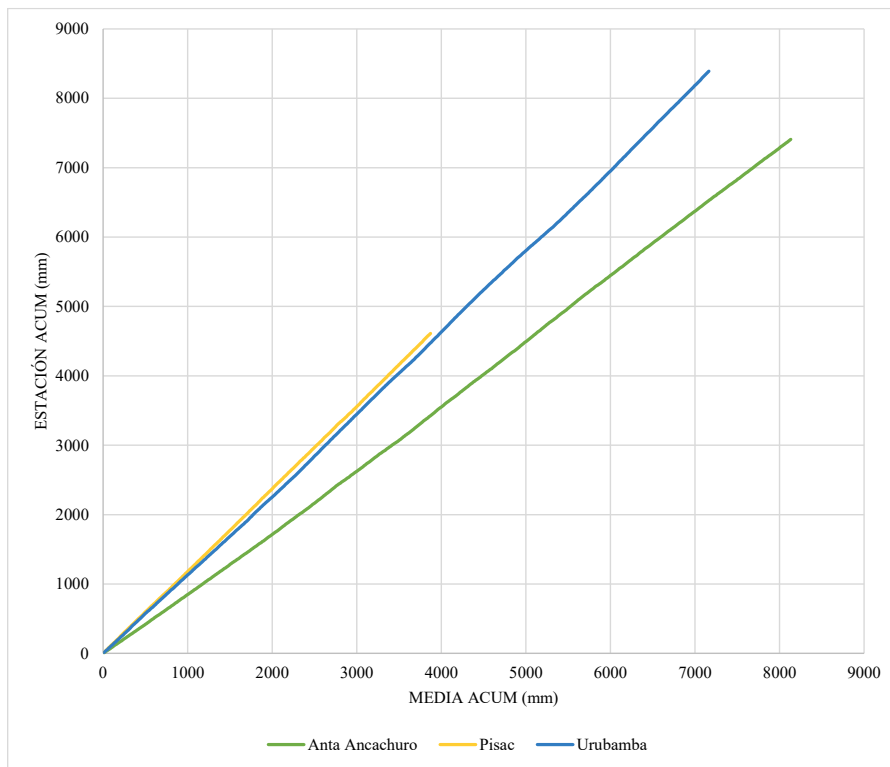
Anexo B. Diagramas de doble masa de cada estación meteorológica (TMED)**Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 1****Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 2**

Diagrama de doble masa entre la media y las estaciones del Grupo 3

Anexo C. Diagramas de doble masa de estación base vs cada estación meteorológica (TMED)

Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Acomayo

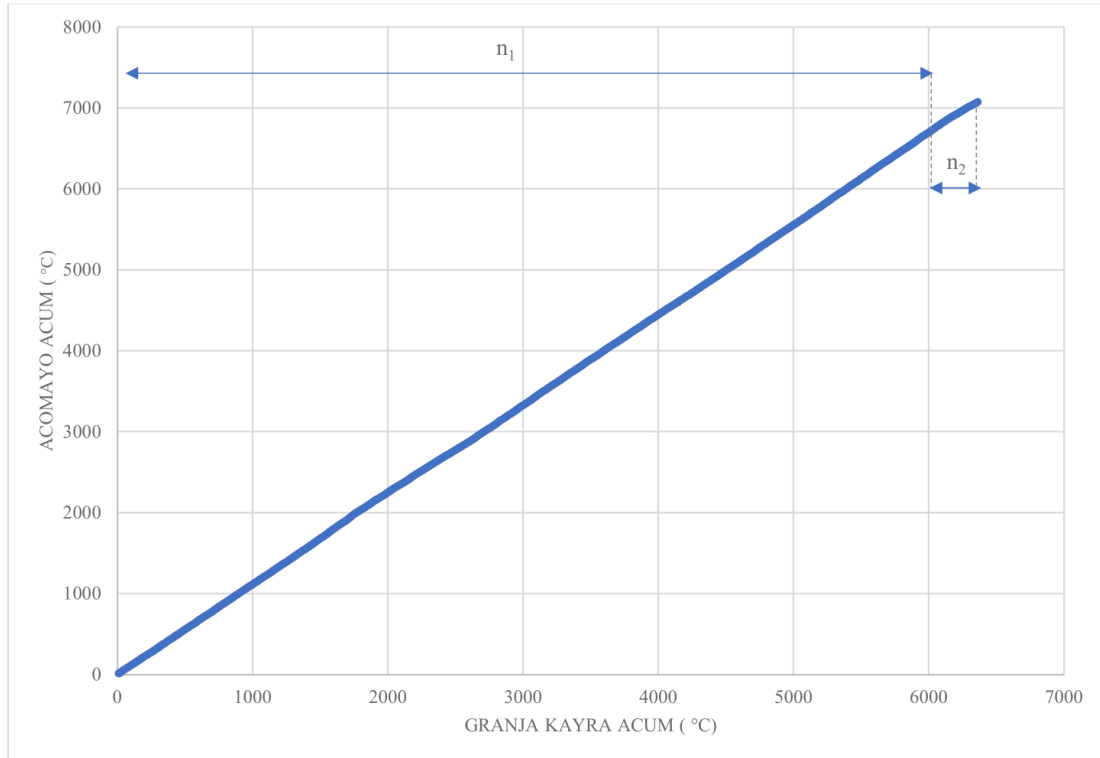


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Anta Ancachuro

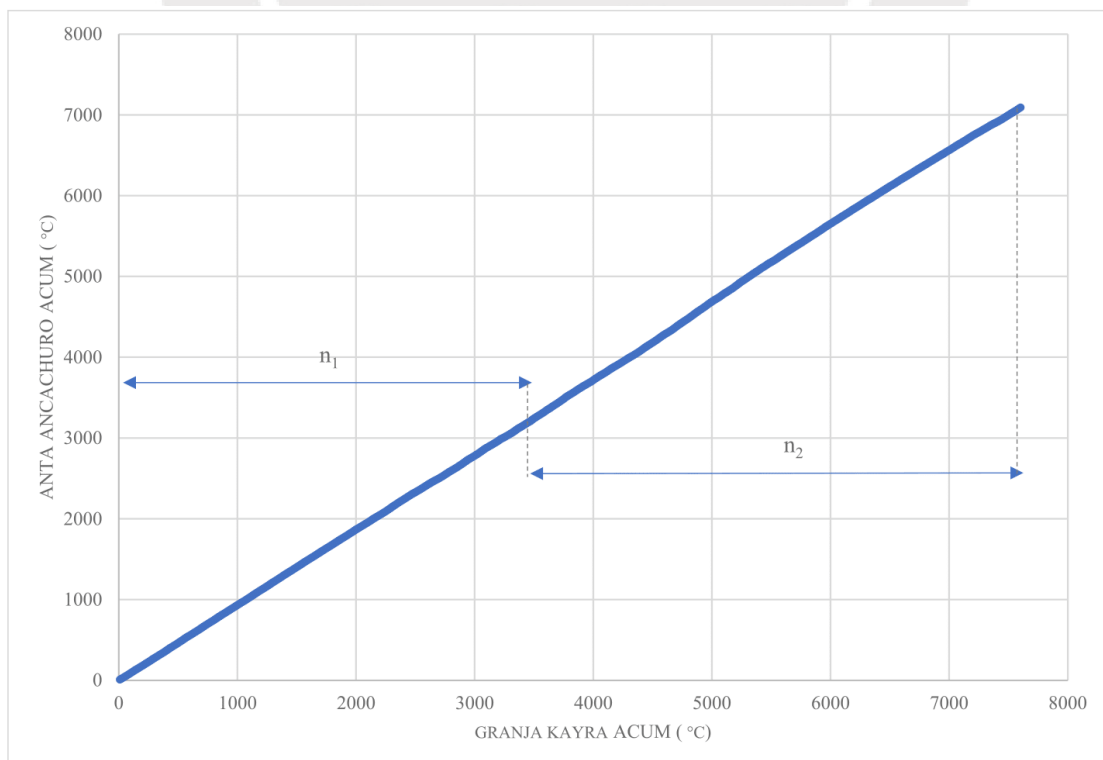


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Ccatcca

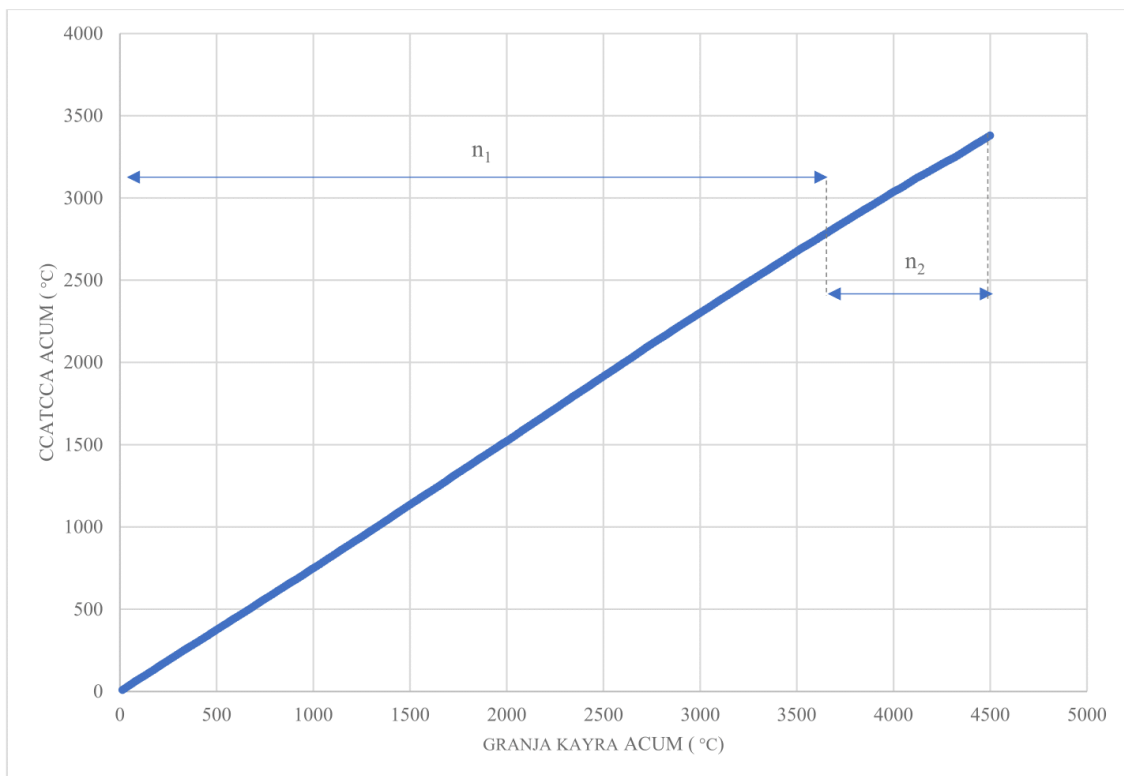


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Paruro

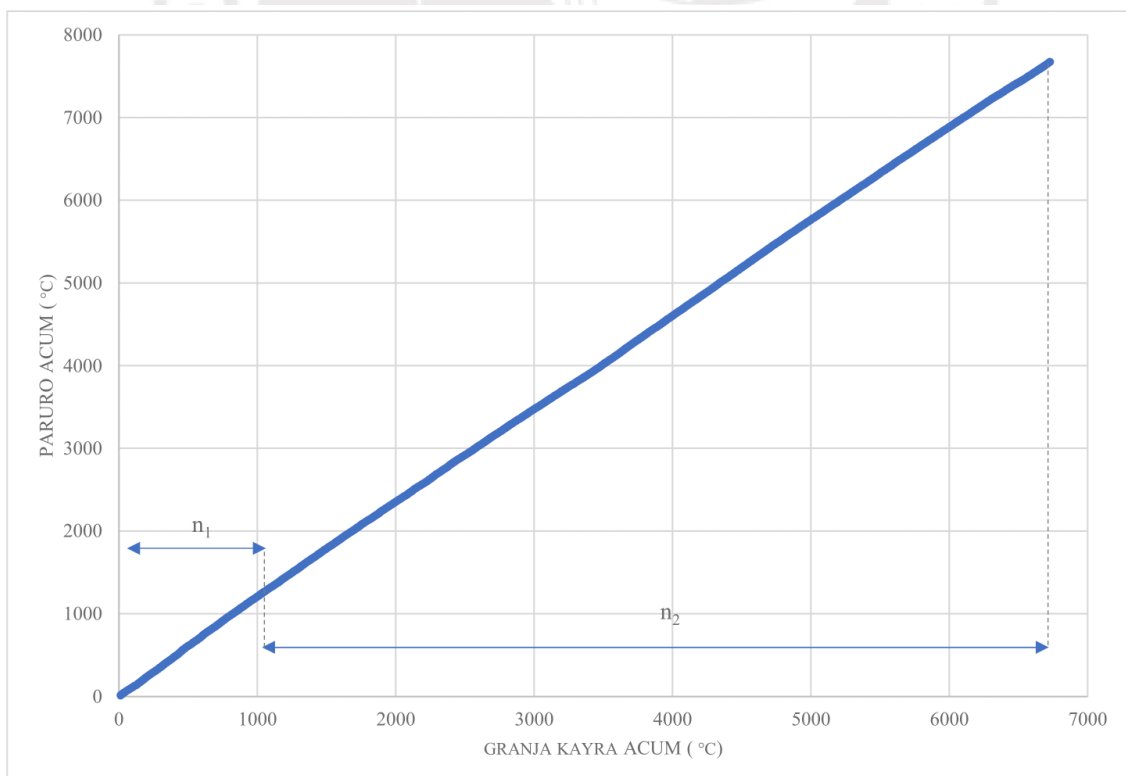


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pisac

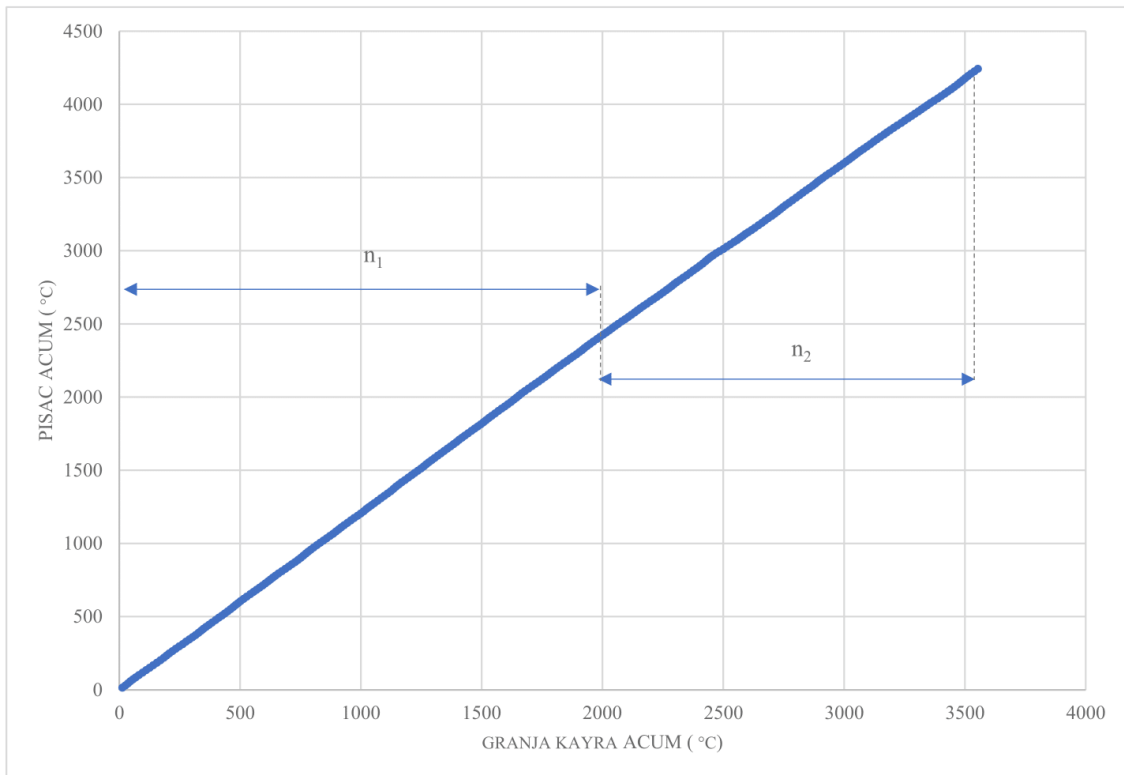


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Pomacanchi

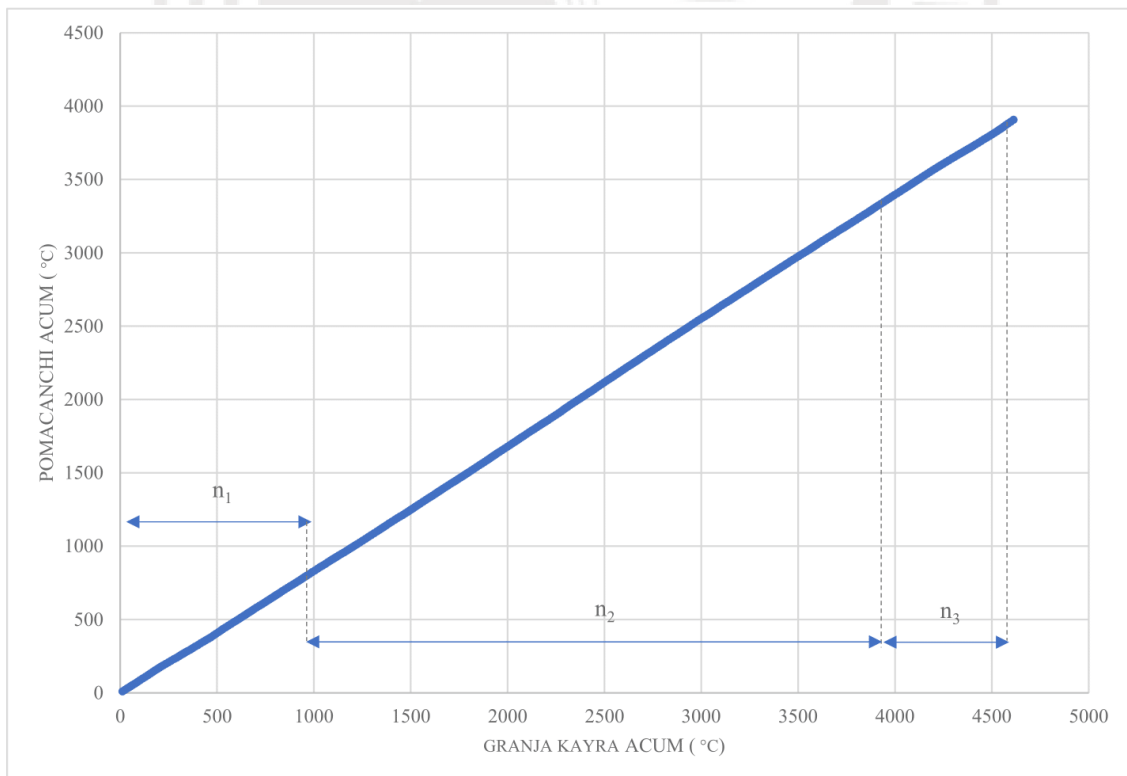


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Sicuani

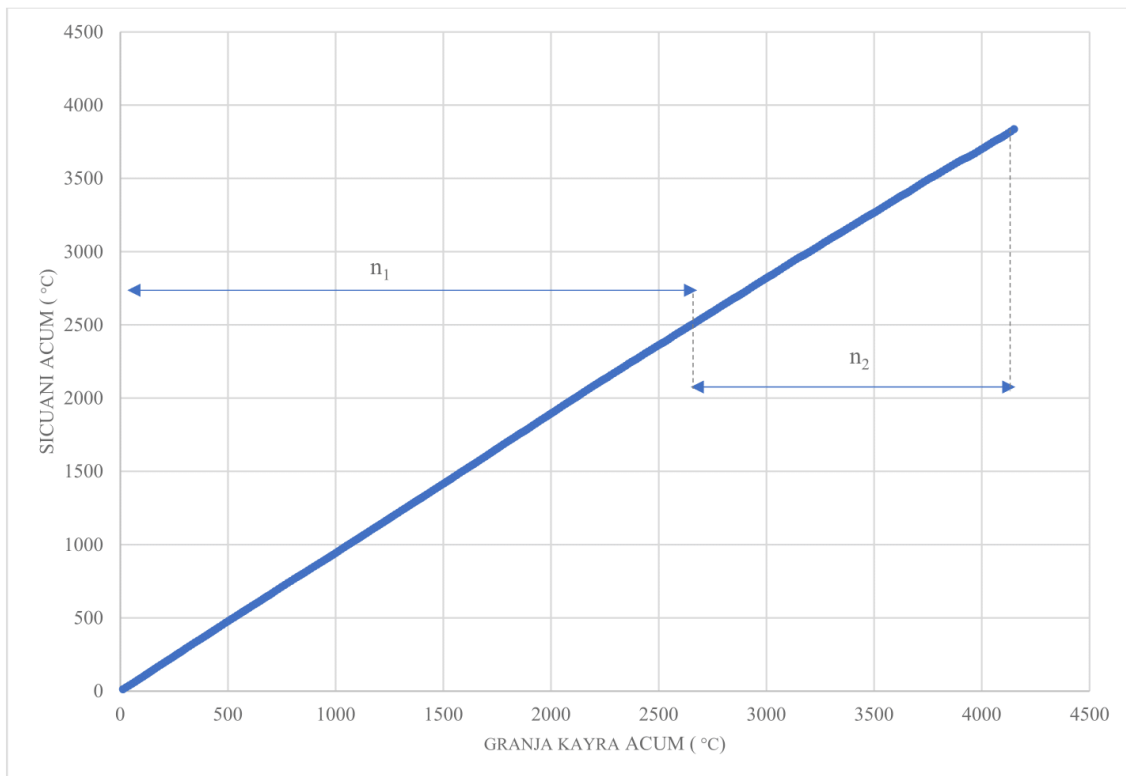
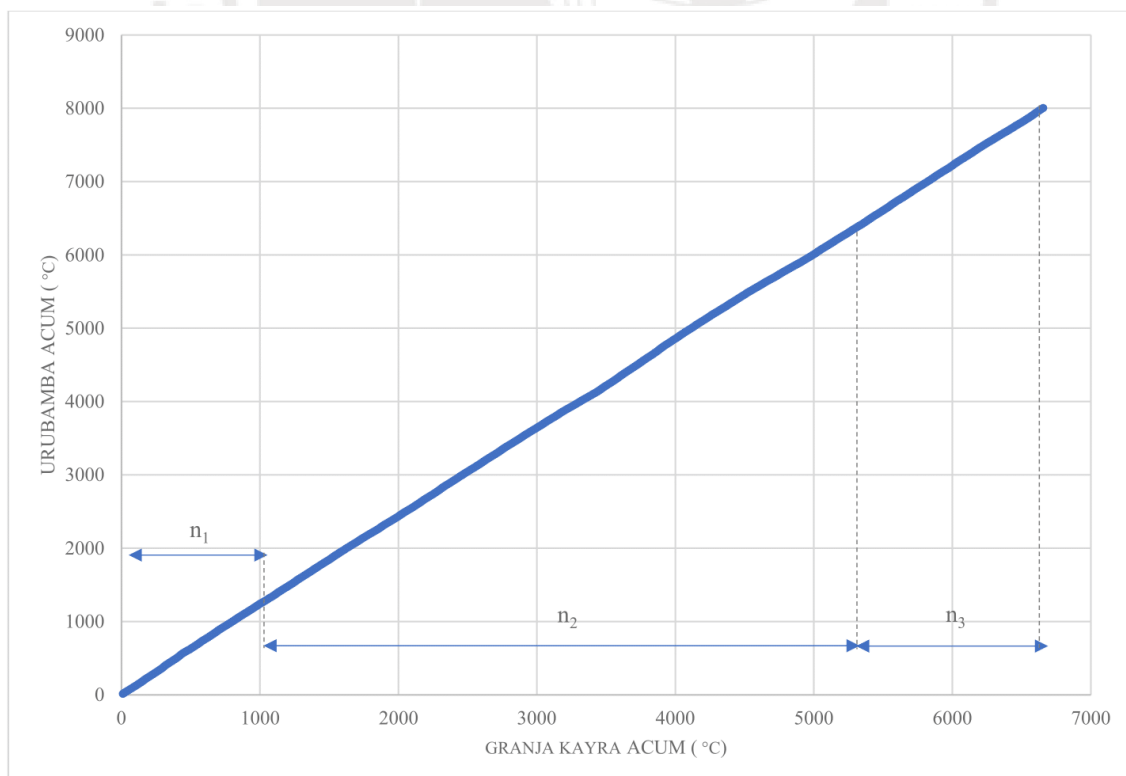


Diagrama de doble masa entre las estaciones Granja Kayra vs Urubamba



Anexo D. Tabla de Temperatura Media Mensual media areal

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	11.0	10.6	10.8	10.3	11.3	11.4	10.1	10.3	10.8	12.0	11.6	12.2
1965	11.8	11.8	11.5	10.7	12.0	11.6	11.2	12.2	12.6	11.1	12.7	11.1
1966	11.5	12.5	11.5	12.0	12.1	11.1	10.7	13.0	11.6	10.7	11.6	10.7
1967	10.5	9.7	12.7	11.3	10.7	10.2	10.8	11.2	11.2	11.1	11.9	12.0
1968	11.3	11.8	12.6	10.8	11.6	11.5	11.5	10.2	11.2	11.6	9.9	9.8
1969	12.0	12.1	11.2	10.5	10.4	10.9	11.3	11.7	11.6	13.1	11.9	10.9
1970	12.7	12.3	10.9	12.3	10.9	9.4	10.9	11.1	12.9	12.3	9.8	12.1
1971	12.2	9.8	11.8	11.8	11.0	10.0	11.2	12.0	11.1	10.4	13.7	10.6
1972	12.9	12.6	9.9	10.7	11.8	12.4	11.2	10.5	11.3	11.0	11.9	11.2
1973	11.6	11.5	11.6	9.9	9.9	9.8	10.4	12.7	11.9	11.4	10.9	11.4
1974	11.9	11.3	11.8	10.4	10.7	10.5	10.7	12.2	13.1	11.5	10.3	11.4
1975	10.7	11.4	11.9	9.4	10.9	10.7	10.6	12.0	13.3	12.2	12.0	10.9
1976	12.0	11.9	11.9	12.9	10.7	10.8	9.4	8.1	12.1	11.1	9.9	11.3
1977	10.8	11.6	12.7	12.5	11.3	11.1	10.0	9.7	11.1	12.1	12.2	11.0
1978	10.7	10.7	10.6	13.2	11.4	12.0	10.5	11.3	12.2	12.4	10.8	11.0
1979	10.9	11.0	12.6	11.8	11.7	11.2	11.5	13.0	10.6	12.1	11.9	10.9
1980	10.8	9.6	10.6	12.8	10.8	11.6	12.8	10.3	9.1	12.9	10.9	12.9
1981	11.7	10.8	12.9	10.9	10.6	12.3	10.9	12.8	10.2	11.7	12.8	11.7
1982	12.7	10.9	11.7	11.0	10.0	10.2	9.8	10.3	10.9	11.7	11.9	10.6
1983	11.9	11.8	11.2	12.3	11.3	10.2	11.1	10.7	10.4	12.8	13.0	11.0
1984	11.6	10.4	10.6	12.2	11.8	10.8	12.1	11.2	10.8	12.1	10.9	12.0
1985	12.3	10.7	11.7	10.4	11.0	11.2	9.6	9.8	12.1	11.4	13.2	11.7
1986	11.1	12.9	11.3	11.7	12.3	10.9	10.9	12.9	11.2	10.9	10.0	10.3
1987	12.5	10.9	11.4	11.8	10.7	10.6	13.0	11.4	12.0	11.1	11.7	12.5
1988	12.1	11.6	11.3	11.6	11.5	10.7	10.1	12.0	12.8	11.5	11.6	11.5
1989	11.0	12.3	11.0	13.2	10.7	12.4	11.3	8.9	11.9	10.3	11.5	10.8
1990	11.9	11.5	12.0	11.1	11.9	10.1	9.5	12.0	12.8	13.6	10.9	10.7
1991	11.5	11.4	13.5	11.2	11.0	11.9	10.8	9.9	11.7	11.7	11.6	12.0
1992	10.7	11.4	11.1	11.5	10.1	10.8	11.4	11.0	11.8	12.3	12.4	12.8
1993	11.7	11.9	11.5	11.9	10.9	9.4	9.7	10.4	11.8	12.5	12.8	12.0
1994	11.8	11.7	11.5	11.5	10.3	9.1	9.0	10.5	12.2	12.8	13.2	12.5
1995	12.2	12.6	11.9	12.0	10.8	9.7	10.2	11.5	12.1	13.5	13.3	12.5
1996	11.6	11.8	12.0	11.6	10.7	9.0	9.2	10.6	12.3	13.0	12.7	12.0
1997	11.8	11.5	11.4	11.0	10.1	9.0	9.5	10.6	12.9	14.0	13.5	13.5
1998	13.8	13.5	13.3	13.1	10.4	9.6	9.4	11.2	12.6	13.1	13.1	12.7
1999	12.1	11.4	11.2	11.0	10.2	11.1	10.2	10.0	11.6	12.1	13.3	12.8
2000	11.6	11.2	11.0	11.3	10.1	8.9	8.7	10.5	12.0	11.9	13.9	11.9
2001	11.0	11.3	11.3	11.1	10.1	9.4	10.4	9.7	11.9	12.8	13.5	12.6
2002	12.2	11.6	11.8	11.2	9.8	9.6	8.5	9.9	11.4	12.6	12.5	12.6
2003	12.2	12.2	11.7	11.3	10.1	10.4	11.1	10.2	11.4	13.1	13.6	12.7
2004	12.1	12.0	11.8	11.2	10.1	11.0	9.9	9.5	11.1	13.0	13.2	12.4
2005	12.7	12.0	12.5	11.7	10.5	9.1	9.8	10.2	11.7	12.7	13.2	12.4

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	11.4	12.2	12.0	11.2	9.0	9.1	10.1	10.7	12.1	12.9	12.6	12.6
2007	12.6	12.1	11.4	11.4	10.3	10.5	9.1	10.5	11.6	12.5	13.2	12.4
2008	11.2	11.2	11.0	10.9	9.5	8.9	9.1	10.8	11.9	12.7	13.5	12.3
2009	11.8	11.7	11.7	11.2	10.0	9.3	8.8	10.2	12.5	13.4	13.2	12.8
2010	12.1	12.6	12.4	11.8	10.4	9.5	9.1	10.5	12.6	13.0	13.5	11.9
2011	11.5	11.0	11.3	11.2	9.7	8.4	8.1	10.4	11.3	12.6	14.0	12.0
2012	11.6	10.8	11.4	11.1	9.6	8.5	8.3	9.5	11.6	12.9	13.6	10.3
2013	11.7	11.8	12.0	11.2	10.5	9.3	9.2	10.5	11.8	12.7	13.0	11.9
2014	11.8	12.7	11.9	11.3	10.3	9.8	9.4	10.0	11.5	12.4	13.6	12.6
2015	11.6	11.8	11.9	11.1	10.4	9.6	8.9	10.4	12.3	12.6	13.5	12.4
2016	13.1	12.7	12.9	11.7	10.2	9.2	9.2	10.4	11.8	12.1	13.2	12.8
2017	12.2	12.0	11.6	11.5	10.7	9.9	10.1	10.9	12.0	12.4	12.9	12.6
2018	11.8	11.6	11.6	11.1	10.3	9.1	9.1	9.9	11.9	12.0	12.9	12.7
2019	12.4	11.9	11.9	11.6	10.4	9.4	9.2	10.1	11.9	12.7	12.5	12.5
2020	12.4	12.3	12.2	11.5	10.9	9.9	9.4	10.9	12.2	12.3	13.7	12.0
2021	12.0	11.9	11.4	11.1	9.9	9.4	9.1	10.6	12.0	13.2	13.0	12.2
2022	11.5	11.5	11.7	11.3	10.1	8.5	9.4	10.7	12.1	13.1	13.8	12.0

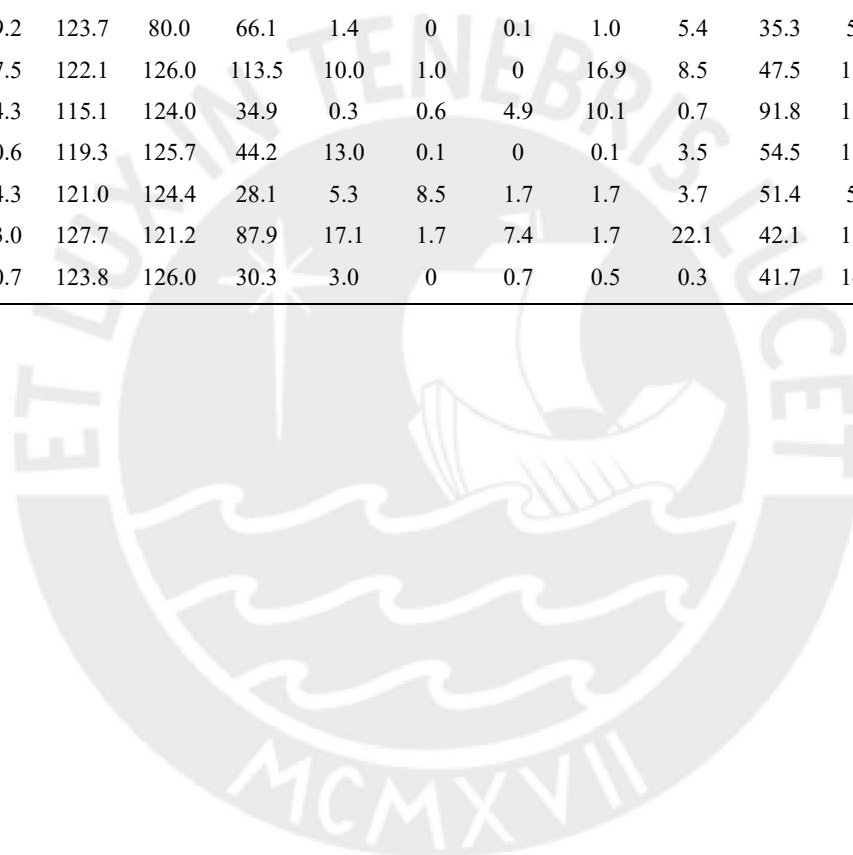


Anexo E. Tablas de Evapotranspiración Potencial Mensual

Estación Acomayo

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	53.5	82.1	124.6	55.0	6.0	0.2	0.1	0	0	0	90.9	115.5
1965	107.1	91.3	111.6	52.1	8.8	0	0	0	46.1	58.8	67.7	135.0
1966	148.1	122.8	82.9	15.6	63.7	0	0	17.9	49.1	94.5	138.7	127.7
1967	93.2	112.4	120.8	39.5	1.0	1.0	23.0	39.1	37.0	101.2	54.6	139.6
1968	126.5	116.3	121.6	46.1	1.0	0	23.1	12.9	41.4	65.0	121.2	95.1
1969	130.9	117.7	128.0	51.9	0	1.2	7.5	2.6	26.0	74.0	91.0	139.3
1970	127.5	86.1	126.4	95.5	2.4	0	9.3	0	42.6	64.3	79.0	133.6
1971	135.2	107.7	84.6	45.3	3.5	1.6	0	28.9	5.3	58.2	71.2	133.0
1972	125.8	109.3	118.8	114.2	10.0	4.2	9.0	4.4	0	0	55.0	60.0
1973	126.6	116.8	122.6	108.0	6.3	0	0	13.6	25.4	51.4	96.5	99.5
1974	117.4	102.9	125.7	46.2	12.4	13.8	0	33.2	12.8	38.6	82.6	67.4
1975	128.3	111.7	116.1	70.2	30.2	1.1	0	1.4	32.5	50.6	82.4	131.3
1976	123.7	116.0	114.1	49.5	9.8	7.0	4.9	2.6	43.2	5.6	72.7	130.5
1977	133.2	110.1	123.4	59.1	15.5	0	1.8	0	26.9	48.0	130.2	70.5
1978	126.8	119.7	128.8	63.9	6.0	0	0	1.9	46.9	9.6	134.5	138.0
1979	135.4	118.5	117.9	63.8	13.6	0	0	4.2	8.0	13.4	115.5	138.6
1980	137.5	126.2	123.3	18.6	0	0	0	1.3	5.1	94.4	28.4	88.0
1981	132.3	121.1	129.1	98.4	0.5	0	0.2	3.3	40.0	85.7	13.5	103.2
1982	126.0	70.9	123.6	82.0	4.8	0	0	11.5	28.8	82.0	128.0	58.4
1983	28.7	54.9	62.2	66.1	2.5	1.0	0	12.9	5.5	27.3	28.1	132.7
1984	121.4	115.0	112.1	84.7	0.4	0.2	1.8	11.7	0.2	47.3	77.4	141.8
1985	139.9	117.0	125.2	58.0	2.2	0	0	0.2	30.0	97.8	128.8	127.5
1986	139.4	119.8	126.0	85.0	0.8	0	0.3	4.5	4.0	17.2	93.1	125.9
1987	137.6	119.5	65.7	21.5	0	1.1	17.6	0	65.0	113.2	138.5	150.8
1988	129.3	124.7	120.5	105.9	13.7	0	0	6.2	16.7	49.2	68.0	153.6
1989	140.2	107.5	129.2	101.6	13.6	1.8	0	8.1	16.5	63.2	93.3	115.6
1990	138.1	120.6	84.7	95.6	14.4	66.0	1.7	1.7	32.9	117.6	144.7	145.6
1991	145.9	127.9	135.4	42.6	5.1	1.4	0	0	49.1	66.6	126.7	67.1
1992	88.9	112.1	75.4	13.5	3.0	5.4	3.2	12.0	18.5	74.8	124.4	64.9
1993	136.5	85.5	87.4	68.4	1.7	4.8	9.2	5.0	28.3	38.0	100.4	133.0
1994	94.4	114.1	123.9	91.9	5.3	1.7	1.7	1.7	13.5	39.8	88.5	98.9
1995	122.2	122.1	92.4	57.6	1.7	1.7	12.8	1.7	31.5	33.9	95.5	141.2
1996	129.1	119.3	122.1	79.8	17.6	1.7	2.8	38.7	29.3	88.2	65.2	133.1
1997	127.0	111.0	123.5	31.0	20.7	1.7	1.7	22.0	3.0	59.9	143.2	148.0
1998	140.2	127.7	128.3	34.4	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	59.3	109.3	140.2
1999	134.9	108.8	114.5	105.4	1.7	1.7	1.7	1.7	24.5	52.4	31.7	141.4
2000	127.4	111.9	100.5	44.2	9.7	11.2	6.6	23.3	25.0	118.5	19.9	141.1
2001	116.7	109.4	116.5	49.9	18.2	5.4	13.6	18.8	21.4	44.2	103.9	140.0
2002	136.0	109.5	116.6	70.1	21.4	2.9	23.3	9.9	26.7	55.3	116.6	134.5
2003	134.6	113.5	115.9	61.0	15.9	12.7	1.7	5.9	5.1	47.6	76.7	139.0

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2004	127.9	121.6	97.4	71.0	20.1	15.8	13.3	36.5	39.3	43.6	94.5	139.7
2005	46.9	116.8	105.6	54.9	6.4	1.7	1.7	4.9	1.7	69.1	91.3	103.1
2006	128.5	124.9	125.3	109.3	1.7	15.2	1.7	7.5	6.5	65.3	137.1	144.1
2007	138.3	95.8	117.9	102.5	0.5	1.7	7.7	1.7	4.9	57.5	106.9	98.6
2008	121.5	125.6	85.3	47.4	23.5	10.1	1.7	1.7	15.4	81.3	90.2	140.2
2009	133.8	115.3	110.7	85.4	10.6	1.7	11.4	1.7	6.6	24.2	142.1	141.1
2010	133.0	105.1	123.7	22.4	12.5	0	1.7	14.0	7.2	67.3	46.6	136.9
2011	136.6	108.2	120.1	69.5	5.2	5.5	10.8	1.7	67.0	39.4	54.2	138.2
2012	133.2	110.8	120.8	56.9	5.5	16.0	1.7	1.7	32.2	29.7	118.8	138.7
2013	135.0	114.3	85.5	47.9	0.2	3.2	0.1	3.5	8.9	93.9	123.8	139.1
2014	138.2	120.6	88.8	50.3	1.2	0	0	26.0	3.1	36.5	62.4	136.1
2015	139.5	121.4	88.7	114.9	6.2	0.2	0.2	1.5	10.1	30.0	149.4	142.6
2016	139.2	123.7	80.0	66.1	1.4	0	0.1	1.0	5.4	35.3	50.0	143.4
2017	137.5	122.1	126.0	113.5	10.0	1.0	0	16.9	8.5	47.5	110.5	109.6
2018	134.3	115.1	124.0	34.9	0.3	0.6	4.9	10.1	0.7	91.8	106.9	131.3
2019	130.6	119.3	125.7	44.2	13.0	0.1	0	0.1	3.5	54.5	139.6	141.2
2020	134.3	121.0	124.4	28.1	5.3	8.5	1.7	1.7	3.7	51.4	56.6	109.0
2021	123.0	127.7	121.2	87.9	17.1	1.7	7.4	1.7	22.1	42.1	136.6	97.1
2022	130.7	123.8	126.0	30.3	3.0	0	0.7	0.5	0.3	41.7	142.4	76.4



Estación Granja Kayra

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	71.6	109.3	101.6	25.8	6.5	0	0	0	0	36.5	0	65.6
1965	101.8	100.5	112.4	88.0	5.8	0	0.3	0.3	29.6	58.3	42.5	137.0
1966	78.3	122.5	79.9	18.3	19.8	0	0	1.7	31.9	59.7	65.2	71.4
1967	59.1	118.4	121.8	19.0	1.8	0.6	11.0	19.8	32.8	70.9	57.1	124.9
1968	131.1	103.2	84.5	34.6	6.3	5.3	30.9	8.6	16.2	84.6	86.4	54.6
1969	134.6	77.8	86.6	15.3	3.2	2.6	7.2	3.9	22.8	27.1	54.7	72.7
1970	133.4	92.6	128.0	86.1	2.3	1.1	3.7	3.4	42.1	46.1	48.2	134.1
1971	128.9	112.3	83.6	40.0	1.5	0.1	0	5.7	3.5	55.7	51.0	127.5
1972	129.0	66.8	57.2	29.7	3.4	0	6.5	27.3	12.2	7.9	50.2	100.2
1973	128.9	118.1	99.6	75.2	14.0	0	9.1	11.8	14.5	65.1	88.8	96.5
1974	102.5	113.4	121.5	34.5	3.6	8.2	1.0	34.6	5.9	43.3	60.9	108.0
1975	124.7	113.3	55.3	66.8	22.5	0.7	0.3	0.6	51.1	47.5	51.0	136.4
1976	119.6	83.1	123.1	42.9	13.0	8.7	0.7	2.5	26.8	25.3	47.8	66.8
1977	116.7	116.1	69.3	47.6	7.9	0	4.4	0	29.9	65.0	71.5	78.0
1978	128.3	106.1	88.5	48.7	11.4	0	3.4	0	13.7	12.3	86.7	117.9
1979	101.1	122.5	108.8	46.8	6.2	0	0.9	8.1	11.5	18.4	85.6	81.8
1980	106.2	126.4	130.1	23.2	3.7	0	5.3	1.0	12.6	62.9	60.2	83.1
1981	135.4	80.8	124.4	56.9	1.8	3.9	0	9.8	45.9	108.9	120.8	138.7
1982	131.8	115.5	126.1	58.8	0	9.2	3.4	4.9	14.0	37.9	122.5	98.6
1983	128.4	84.0	54.5	29.8	3.4	6.2	0.5	0.9	5.5	26.0	44.3	100.2
1984	127.3	114.2	71.0	82.8	0	2.0	1.3	11.4	4.2	114.6	68.5	102.8
1985	129.1	119.4	74.2	33.2	15.6	11.6	0.9	0	43.3	62.1	116.5	123.6
1986	76.4	92.2	125.7	65.5	6.2	0	1.8	4.2	7.5	17.3	69.6	102.7
1987	134.1	87.9	48.6	13.1	2.1	1.3	9.2	0	8.2	26.5	101.8	107.6
1988	136.4	84.3	121.3	108.9	4.6	0	0	0	9.9	36.2	47.6	103.7
1989	124.9	115.8	119.3	38.6	6.4	9.1	0	6.1	30.7	35.6	60.7	88.5
1990	132.3	90.4	60.2	47.4	7.5	31.8	0	5.8	13.3	73.7	86.9	66.5
1991	97.6	119.6	105.2	45.1	11.0	5.1	1.5	0	21.4	49.3	83.6	99.0
1992	114.1	102.4	104.0	14.9	0	19.4	0	21.4	8.0	50.7	117.4	57.0
1993	127.3	110.5	75.8	18.8	0.9	0	2.7	6.9	18.0	46.2	111.9	131.7
1994	129.5	116.3	124.4	45.5	11.8	0	0	0	25.7	40.2	40.5	119.9
1995	122.0	94.8	95.3	17.8	0	0	0.6	1.2	28.8	26.7	70.2	102.6
1996	88.7	77.7	65.3	36.1	0.3	0	0	112.9	16.4	57.6	71.7	96.8
1997	123.3	113.2	104.8	31.0	4.8	0	0	7.1	12.3	44.4	140.4	145.4
1998	116.3	126.9	22.6	31.0	1.6	1.9	0.1	1.6	4.3	49.8	49.7	58.9
1999	89.3	92.2	92.0	42.8	1.3	3.4	1.0	0	43.1	18.8	39.7	119.5
2000	131.4	117.1	119.5	10.9	2.6	5.8	2.7	4.5	10.7	49.3	29.3	82.0
2001	122.4	111.8	122.0	36.4	11.5	0	17.4	10.2	20.6	38.3	96.8	89.4
2002	134.5	109.8	112.7	21.6	16.2	2.5	27.1	3.7	10.3	78.7	97.8	132.4
2003	138.6	120.7	120.8	56.5	2.0	6.4	0	21.3	3.7	34.6	23.1	123.8
2004	134.0	125.8	66.5	21.0	2.4	20.5	17.0	9.0	21.7	25.6	60.9	87.9
2005	90.7	92.6	120.2	33.1	3.2	0.4	1.2	4.0	4.5	39.1	59.3	102.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	128.0	121.8	123.2	40.9	0.2	4.9	0	10.5	12.5	72.5	67.8	140.5
2007	140.7	89.3	107.3	93.6	5.8	0	4.0	0	1.0	49.4	74.0	88.4
2008	108.8	109.2	64.4	7.6	8.7	2.1	0	3.9	13.9	51.7	90.2	138.3
2009	112.5	108.3	79.1	21.3	5.3	0	3.3	0.7	15.1	8.3	88.7	82.9
2010	134.7	124.8	129.2	16.6	1.3	0	1.4	4.7	8.2	70.0	40.0	140.7
2011	103.4	107.8	122.7	67.6	3.9	3.2	3.7	0	38.9	38.2	60.2	110.2
2012	70.5	116.8	41.7	48.1	4.5	1.2	0	0	18.4	19.5	138.2	135.5
2013	139.7	120.6	75.5	15.1	25.3	6.1	2.0	12.4	6.3	105.0	86.0	139.3
2014	141.1	116.5	40.0	35.0	10.1	0	3.2	5.8	8.2	47.5	30.0	139.9
2015	130.3	123.8	66.7	69.8	18.6	3.9	10.3	4.6	16.1	19.1	48.6	113.0
2016	104.0	122.7	54.3	24.4	3.0	0	4.5	0.5	7.0	79.5	28.0	89.8
2017	111.2	108.3	122.8	47.5	11.2	5.9	0	8.4	19.0	33.7	61.4	101.7
2018	131.4	120.4	123.2	20.3	0.2	16.0	11.6	7.1	9.1	84.8	80.8	95.0
2019	127.8	115.1	124.0	30.0	28.2	1.5	3.7	0	9.8	82.4	111.7	133.3
2020	126.7	114.6	108.7	25.3	16.8	4.4	8.2	1.0	5.6	7.5	46.6	133.7
2021	127.7	115.7	75.7	61.6	8.7	10.7	0	4.3	1.5	46.1	101.6	106.1
2022	121.2	80.6	102.7	29.7	14.0	0.5	0	0	0	155.2	118.7	89.4



Estación Paruro

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	60.8	97.3	110.0	41.2	23.5	21.8	21.8	21.8	32.7	36.6	52.1	44.6
1965	83.8	78.9	110.0	48.5	22.8	21.8	21.8	21.8	32.0	34.1	38.2	112.6
1966	54.6	129.0	67.2	28.5	33.3	21.8	21.8	23.9	41.9	54.8	83.9	63.7
1967	26.0	123.3	122.8	33.1	23.4	21.8	21.8	31.1	29.0	58.4	45.4	153.1
1968	160.7	144.9	150.0	21.8	21.8	21.8	32.7	23.9	34.7	47.1	118.1	68.3
1969	152.0	141.2	131.5	41.4	30.0	23.5	9.1	0	0	0	0	120.3
1970	144.6	79.8	115.0	65.2	6.0	1.5	14.8	5.0	40.2	50.8	59.4	152.1
1971	132.4	125.9	77.6	47.5	0	2.8	0	0	8.4	49.0	48.7	141.6
1972	143.3	95.8	98.1	41.9	5.0	0	8.8	18.7	28.0	28.2	57.3	107.8
1973	148.2	133.9	141.7	61.0	23.6	0	9.0	13.3	31.1	40.5	112.2	89.7
1974	138.6	119.3	143.4	62.0	0.8	10.2	0	37.8	8.5	49.2	97.7	83.9
1975	149.9	125.0	116.8	56.2	30.1	4.2	0	2.0	28.1	62.7	96.9	150.7
1976	141.0	106.3	117.2	56.6	14.3	4.2	0	0.8	38.0	23.2	81.6	120.7
1977	112.3	128.7	138.5	60.0	3.0	0	2.6	0	56.4	75.5	106.6	63.2
1978	143.6	87.0	146.4	45.8	11.6	4.8	0	0	48.7	16.8	129.8	114.9
1979	150.2	130.8	129.0	45.8	13.9	0.7	0.8	2.3	7.0	13.4	78.2	94.6
1980	148.7	112.4	72.8	6.6	0	0.1	1.3	0	14.4	42.4	116.2	152.0
1981	149.3	131.4	143.4	34.5	0	4.0	0	12.0	26.4	42.4	41.0	45.4
1982	59.4	40.4	24.4	4.0	0.5	8.3	0.6	7.4	32.8	55.3	130.7	118.4
1983	44.4	105.5	134.6	62.3	10.8	16.9	0.1	5.3	5.1	32.9	18.0	77.1
1984	142.0	110.4	74.1	46.6	0.8	1.8	3.6	2.1	7.5	22.2	24.8	131.6
1985	154.4	125.0	123.9	33.6	8.7	8.6	1.6	0.5	43.1	81.1	122.1	154.3
1986	77.5	134.9	133.2	59.3	0	0	0	0	0	2.0	90.0	153.0
1987	154.7	75.2	91.0	47.1	0	0	8.6	0	6.4	82.6	130.7	153.2
1988	140.9	107.0	133.0	76.6	38.8	0.4	0.3	0	6.1	17.7	28.0	99.7
1989	139.1	90.7	123.2	51.4	15.8	17.3	0.8	7.1	16.8	22.3	69.5	99.5
1990	158.7	117.7	111.5	64.2	10.0	88.1	0.1	2.6	16.0	46.4	130.7	90.4
1991	117.1	138.9	142.7	59.5	0.9	4.0	0.1	0	5.3	72.7	89.4	95.2
1992	122.6	123.8	126.7	14.9	0.3	12.6	0	19.5	6.8	79.5	130.2	83.5
1993	152.4	113.9	109.0	38.0	0	0	18.4	5.0	18.0	57.0	90.5	153.0
1994	141.9	121.0	145.1	88.0	12.0	0	1.0	1.0	33.0	91.0	112.0	154.3
1995	159.6	72.0	126.0	24.0	0	0	7.0	0	38.0	34.0	60.4	157.0
1996	154.3	110.0	95.3	71.3	21.6	0	0	34.5	26.1	76.3	82.9	112.8
1997	138.7	124.1	138.2	60.0	13.0	0	0	9.0	4.0	69.5	153.3	125.5
1998	160.3	134.9	96.2	56.0	0.3	3.0	0	1.5	0.7	105.5	94.5	105.0
1999	147.3	98.2	129.3	52.0	0	2.0	0	0	28.5	61.0	37.5	133.5
2000	140.9	120.9	115.0	13.5	4.5	10.0	9.0	11.0	7.0	70.5	15.4	95.4
2001	131.4	118.7	129.4	21.3	5.4	3.5	10.5	6.7	16.0	78.1	75.4	91.5
2002	142.8	121.5	130.5	43.9	22.6	4.2	18.5	18.8	29.7	76.1	114.0	148.4
2003	151.6	129.4	131.0	50.5	5.9	2.6	0	8.7	7.4	65.1	38.2	150.6
2004	143.6	132.7	56.8	22.6	14.1	12.2	8.7	0	34.4	59.8	53.8	148.1
2005	113.0	107.1	96.0	23.3	1.9	0	2.5	2.2	0.4	43.3	96.6	105.6

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	138.8	132.9	132.5	90.0	0	6.2	0	8.8	27.4	42.3	77.2	109.8
2007	149.6	99.1	131.0	46.7	2.1	0	0.6	0	11.3	39.5	101.7	127.7
2008	135.2	141.3	100.3	22.5	21.4	4.5	0	3.2	28.4	52.0	75.1	118.7
2009	147.9	123.2	92.7	33.4	6.5	0	6.4	0.3	11.8	16.3	151.7	150.7
2010	147.0	135.2	126.7	45.1	4.5	0	0	6.9	2.5	59.1	62.1	150.1
2011	84.1	117.9	133.2	51.1	2.4	3.2	4.9	0.7	40.3	72.1	47.3	154.2
2012	139.8	128.9	111.0	30.7	1.4	4.4	1.6	0	41.0	28.8	156.9	148.7
2013	145.8	131.8	97.9	27.6	0	7.0	1.5	15.4	14.7	106.9	101.2	158.5
2014	152.2	136.8	96.5	62.0	6.1	0	4.0	2.1	12.3	42.9	24.4	159.3
2015	147.3	110.8	116.5	74.6	17.9	0	3.2	6.5	47.7	21.0	80.0	154.2
2016	103.3	132.7	85.8	31.3	4.8	0	7.2	3.2	20.0	88.1	45.3	122.9
2017	143.0	133.8	131.4	83.2	25.6	2.2	2.3	11.6	16.3	45.0	76.7	115.5
2018	133.3	130.3	135.7	31.7	0	10.9	21.0	14.1	10.5	110.1	71.5	99.4
2019	151.3	129.3	136.8	50.4	12.3	0	8.1	0.5	4.1	71.7	147.4	152.4
2020	138.7	128.6	138.0	29.7	18.7	7.6	1.2	0	7.6	17.9	74.1	147.3
2021	142.3	117.7	132.7	81.9	20.6	0.9	2.6	0	17.2	42.6	136.1	154.6
2022	129.3	125.2	134.3	47.6	19.4	7.8	0	0	0	0	175.3	144.6



Estación Pisac

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	96.8	73.9	89.3	4.0	9.9	0.5	0.5	0.5	52.6	77.5	41.9	38.0
1965	63.0	53.3	84.6	51.4	0.5	0.5	3.4	0.5	41.8	19.7	20.6	87.6
1966	84.6	34.5	32.7	6.4	21.9	0.5	2.8	0.5	19.9	11.8	19.2	44.3
1967	59.7	94.5	113.6	0.5	15.9	3.2	20.7	12.2	11.6	45.2	70.6	77.7
1968	127.0	128.9	38.4	16.2	1.6	6.6	21.7	0.7	10.5	11.7	131.2	36.2
1969	136.9	78.5	123.1	72.9	0.5	23.6	15.9	5.3	24.0	32.0	72.1	123.3
1970	129.8	120.4	131.4	43.1	10.1	9.5	10.1	12.8	53.5	67.7	16.7	133.0
1971	107.6	114.1	58.5	43.7	2.4	9.2	6.7	11.3	5.3	38.5	17.6	34.0
1972	77.0	40.4	95.2	22.4	8.0	5.3	10.2	13.7	14.1	8.1	21.7	56.4
1973	133.7	110.7	98.2	45.2	11.6	11.7	13.7	14.1	10.0	27.0	42.7	105.4
1974	69.4	91.5	73.9	40.6	15.5	15.3	2.4	16.3	0	0	0	136.6
1975	58.4	72.0	60.5	34.4	34.7	8.7	5.3	5.3	19.2	19.2	43.2	50.5
1976	72.1	42.2	73.1	34.7	39.2	9.9	3.8	0	5.9	0	7.9	0
1977	62.3	79.4	51.0	27.9	5.3	5.3	8.0	8.0	13.5	17.8	80.0	14.7
1978	97.0	79.3	73.1	54.8	29.7	8.4	1.6	0	0.9	0	0	138.6
1979	98.5	83.1	93.7	44.6	17.3	13.4	5.8	0	0	0	0	128.0
1980	66.4	122.1	130.3	64.4	6.6	5.3	5.3	12.8	29.5	31.5	8.6	37.3
1981	69.8	120.4	64.4	26.0	11.4	8.1	15.4	7.3	15.5	10.5	83.1	83.0
1982	130.1	50.4	134.7	122.5	22.1	10.6	6.0	15.3	18.4	25.1	74.2	17.6
1983	8.7	72.8	35.1	24.9	5.3	6.6	12.6	9.3	14.1	17.5	25.4	27.7
1984	124.6	72.2	75.8	45.0	3.1	0.6	5.8	16.2	10.7	36.0	52.3	14.3
1985	97.9	113.4	118.5	64.3	8.3	0	0	5.1	27.9	108.1	131.2	25.0
1986	27.8	118.9	130.1	38.5	12.5	0	2.1	3.3	4.0	2.1	8.3	11.8
1987	130.9	45.9	24.6	13.3	0	14.6	9.1	0	0	41.2	124.1	38.8
1988	96.1	99.6	121.4	52.4	2.0	0	0	0	2.3	12.0	13.7	85.9
1989	78.7	71.1	83.9	32.6	16.9	4.3	0	0	0	0	0	149.6
1990	76.7	45.6	20.3	82.6	6.2	38.4	0	3.0	8.4	44.1	99.4	115.0
1991	76.2	101.7	64.5	31.4	11.5	8.0	0	2.0	2.0	50.7	61.4	65.4
1992	81.0	45.4	31.7	22.6	0	26.0	0.1	13.3	4.0	32.0	91.8	73.0
1993	141.9	82.9	12.4	36.0	8.2	4.2	8.2	14.2	3.0	18.2	52.3	134.2
1994	130.2	112.0	120.6	59.8	5.3	0	0	0	12.4	52.6	13.2	139.4
1995	98.9	79.5	80.0	7.2	4.2	0	0	0	12.2	24.2	18.2	51.6
1996	117.6	69.3	44.4	69.3	12.1	0	0	21.6	15.2	52.5	47.5	78.4
1997	127.8	110.6	99.5	4.1	2.9	0	0	20.1	18.1	13.5	108.9	97.8
1998	129.8	98.7	38.2	21.6	4.2	3.0	0	0.8	13.5	64.0	50.9	51.3
1999	93.2	117.2	51.5	28.3	6.1	0.3	2.6	0	30.0	17.7	40.2	105.9
2000	128.6	105.4	58.7	2.2	9.1	3.7	0	2.0	4.4	41.6	11.0	70.6
2001	120.0	106.8	118.5	19.9	12.1	0	19.4	5.6	8.0	50.0	77.4	102.0
2002	90.6	108.1	106.1	35.8	6.6	4.3	46.6	3.3	10.9	39.4	91.6	127.9
2003	114.4	108.7	110.7	15.8	4.4	6.8	0	23.6	4.0	31.7	18.3	120.9
2004	127.7	109.2	95.6	15.8	2.0	16.4	10.3	6.9	32.5	25.9	43.0	94.3
2005	127.0	76.9	69.1	29.6	0	0	1.5	3.7	4.1	18.0	50.5	58.6

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	129.8	82.2	124.3	34.5	0	30.0	0	14.3	14.7	42.7	69.7	117.1
2007	102.7	44.4	123.2	42.1	7.6	0	1.7	0	4.9	32.7	66.9	83.3
2008	120.2	125.3	61.5	8.5	5.9	3.6	0.7	3.2	9.8	46.8	64.1	133.9
2009	89.9	89.4	66.2	14.1	0.2	0	3.1	0.8	20.4	8.2	118.1	115.3
2010	129.3	120.0	129.1	6.0	6.5	1.1	1.4	11.4	1.8	72.7	26.3	142.9
2011	100.7	108.4	109.2	32.9	6.8	7.0	8.6	0.6	27.9	26.2	48.0	131.5
2012	67.0	116.7	54.2	30.1	5.5	0	0.8	0.5	24.1	8.6	127.0	127.9
2013	104.8	115.1	68.1	23.3	10.7	5.4	4.1	15.8	5.6	132.0	52.9	135.9
2014	131.3	82.6	68.7	50.0	12.8	0	1.3	1.5	22.9	37.7	12.5	105.8
2015	78.0	49.8	28.3	54.4	16.5	0	26.8	3.6	13.1	7.4	20.6	51.8
2016	123.9	84.5	19.7	21.8	22.5	0.4	7.3	0	14.1	72.9	27.1	98.2
2017	66.4	52.5	116.2	54.8	12.9	3.2	0.8	5.5	9.0	24.6	40.8	61.9
2018	124.3	119.7	107.0	32.6	3.9	14.2	13.6	15.0	11.8	85.7	92.6	69.4
2019	115.3	77.7	124.6	19.3	17.6	0.5	9.1	0	4.8	53.1	97.2	106.9
2020	136.1	107.6	65.0	13.1	2.6	0.4	0.9	0	0.1	5.4	27.6	78.6
2021	90.5	92.8	40.4	24.3	6.9	0.8	0	2.3	2.6	30.1	87.8	66.3
2022	108.3	43.4	106.4	5.8	1.1	0.2	0	1.5	14.6	0.6	53.3	72.4



Estación Pomacanchi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	81.0	62.1	68.4	22.8	84.3	57.5	53.1	49.4	88.6	122.8	22.4	105.5
1965	58.2	6.7	104.5	82.7	9.2	37.1	87.5	101.5	8.5	42.2	53.4	8.5
1966	17.0	104.5	26.2	68.5	4.2	87.0	87.5	86.6	69.5	15.0	122.3	13.9
1967	128.9	53.0	72.0	54.7	46.5	4.9	85.6	82.7	109.2	78.5	121.9	64.4
1968	54.0	105.7	104.2	94.8	30.3	87.9	87.0	88.8	16.8	34.6	60.8	48.8
1969	114.2	50.6	44.2	20.5	14.9	21.4	23.9	34.4	100.7	18.4	62.7	59.3
1970	114.3	44.1	106.4	85.4	44.7	87.9	88.6	20.7	114.0	3.2	17.3	60.7
1971	22.7	95.9	90.1	75.5	95.0	84.2	98.6	53.7	76.9	14.9	113.9	34.1
1972	6.6	104.6	56.3	11.1	2.0	86.3	27.3	102.9	27.1	101.2	5.9	92.7
1973	24.1	103.7	110.4	56.8	93.4	37.1	15.6	14.1	3.1	125.1	25.9	83.5
1974	26.3	98.8	68.5	95.0	1.6	9.4	89.5	58.6	64.6	105.0	41.9	39.6
1975	29.4	108.5	107.6	2.4	93.8	1.8	89.0	11.9	88.0	123.3	55.3	115.9
1976	27.8	64.6	104.8	12.0	60.6	1.2	46.6	23.2	118.2	65.9	28.3	62.3
1977	10.5	6.0	106.8	44.9	96.0	87.7	19.9	110.6	114.8	20.7	109.9	38.6
1978	46.3	9.9	17.9	58.1	95.3	87.0	69.0	87.9	58.5	50.9	122.3	4.7
1979	41.6	72.8	106.8	42.1	3.5	13.9	92.5	15.9	61.0	125.2	126.9	72.1
1980	90.8	63.1	107.8	4.0	93.0	15.9	89.5	59.5	13.5	123.2	32.7	95.9
1981	33.1	100.4	45.7	70.4	94.5	52.3	94.1	51.0	102.4	9.1	52.0	123.3
1982	90.9	108.2	90.6	71.3	28.4	85.5	68.4	66.8	25.2	69.9	96.0	52.8
1983	53.6	27.8	8.0	84.9	52.3	87.0	50.5	108.9	47.8	52.6	129.4	0
1984	85.1	3.3	71.1	74.4	93.1	87.1	73.5	105.4	12.8	103.9	66.9	99.5
1985	119.7	99.9	94.7	96.5	76.0	13.0	72.3	54.4	92.5	72.5	120.6	126.3
1986	5.9	105.0	76.0	43.0	65.9	69.3	48.3	1.5	52.1	105.2	39.0	87.0
1987	28.9	21.0	105.3	59.7	68.9	22.4	21.5	0	115.1	116.8	121.8	39.5
1988	97.3	27.2	62.4	95.0	94.1	51.0	94.9	0	20.9	9.5	34.0	13.7
1989	86.2	103.3	83.1	27.7	24.3	86.7	84.2	82.8	5.8	9.5	5.0	77.6
1990	95.6	112.6	75.0	71.1	94.3	24.4	12.7	25.3	1.5	60.1	116.7	5.4
1991	29.2	22.9	105.4	96.2	64.7	85.3	52.9	93.8	116.6	30.3	38.0	116.6
1992	112.2	90.5	105.0	101.2	77.9	83.9	73.1	15.5	6.5	92.3	89.0	73.0
1993	114.1	105.2	102.5	31.5	0	2.0	6.0	12.0	16.5	87.0	81.0	114.2
1994	113.4	99.5	105.2	47.5	5.5	0	0	1.0	25.5	68.5	88.0	116.5
1995	121.9	107.0	104.7	37.0	13.5	0	8.5	1.5	36.0	9.0	126.0	124.9
1996	117.3	91.5	112.0	55.5	17.0	83.5	0	28.8	32.3	108.0	79.5	116.6
1997	91.2	97.4	108.6	44.3	16.0	0	5.0	12.5	7.5	83.0	123.0	79.0
1998	125.5	110.7	117.8	17.5	0	0	0	107.6	1.0	72.0	104.5	115.0
1999	114.6	93.3	84.2	93.3	9.2	0	1.6	0	19.1	34.4	40.7	106.3
2000	112.3	99.8	104.9	30.6	7.5	14.8	6.0	76.6	22.5	92.3	41.3	122.2
2001	105.1	98.0	101.9	45.2	15.7	3.3	21.3	15.8	18.9	84.0	81.3	125.8
2002	123.2	101.2	105.9	69.0	13.7	0.6	27.8	17.3	62.3	65.5	108.4	118.2
2003	119.7	104.6	105.6	63.5	16.4	8.7	0	6.0	17.1	64.4	50.2	110.0
2004	115.6	107.9	81.5	51.2	25.4	10.2	8.9	16.9	71.5	57.2	67.2	128.5
2005	85.8	105.6	117.5	52.0	2.1	0	0.2	4.3	2.6	74.2	101.5	105.7

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	113.9	108.5	95.6	101.2	1.1	11.1	0	7.3	77.7	80.2	101.3	128.1
2007	122.6	104.4	107.8	77.6	14.1	0	4.8	0	4.0	52.5	99.7	102.7
2008	108.4	109.7	109.6	33.7	12.9	4.4	0	3.1	17.0	77.9	78.3	121.2
2009	117.0	103.1	80.5	41.8	8.6	0	14.1	0	11.0	18.2	125.5	111.1
2010	119.3	88.4	114.2	53.8	2.4	0	0	12.8	5.3	58.9	42.1	117.8
2011	119.1	92.7	102.9	60.2	9.3	4.7	7.1	8.9	56.5	50.9	42.8	124.5
2012	117.1	101.1	100.4	63.9	2.6	10.2	1.1	2.9	34.9	38.3	95.5	109.6
2013	113.2	95.6	91.8	46.2	8.9	1.3	0	19.9	22.3	60.5	105.1	115.7
2014	113.4	102.2	94.0	39.0	7.5	0	3.2	2.5	43.4	92.8	54.3	122.8
2015	111.1	102.7	107.4	80.6	14.7	0	11.2	7.9	6.6	32.4	115.3	121.1
2016	128.5	108.1	73.3	74.9	7.1	0	7.0	3.2	17.2	67.4	47.9	75.5
2017	113.9	102.0	16.9	42.6	25.0	0.6	2.2	13.0	22.4	40.3	70.7	109.9
2018	82.3	18.8	18.3	97.7	95.0	78.5	56.6	56.5	10.5	112.4	94.2	86.7
2019	118.8	100.0	105.9	60.1	8.0	0	4.6	1.4	4.6	44.8	115.5	120.4
2020	117.0	101.7	8.9	38.3	92.9	2.6	0	0.2	10.2	56.7	119.4	120.4
2021	111.0	102.1	102.7	57.2	9.2	21.3	2.4	82.5	12.7	53.4	95.0	118.2
2022	112.5	97.8	105.3	87.8	0	0.3	0	0.7	16.9	8.0	23.7	122.7



Estación Sicuani

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	95.4	101.0	112.0	50.0	31.8	0	2.5	3.2	32.2	25.8	85.1	50.0
1965	43.2	89.7	116.0	51.7	2.1	0	2.4	3.7	52.5	66.1	61.0	124.7
1966	81.6	113.4	94.2	6.0	35.0	0	0	2.3	38.9	140.1	106.0	121.0
1967	63.4	110.2	117.0	33.0	8.2	1.4	21.4	28.7	40.4	49.0	46.8	129.5
1968	118.2	111.0	115.7	55.6	0	0	16.0	28.2	21.4	62.1	136.8	64.2
1969	130.1	116.2	121.2	67.0	3.6	2.8	8.0	1.6	18.0	78.2	76.2	80.8
1970	128.0	117.2	117.0	50.3	5.6	0	0	0	20.4	48.3	46.6	128.4
1971	114.5	94.6	62.7	63.8	20.1	6.4	0	0	0	0	141.1	30.4
1972	124.1	76.5	95.6	58.1	6.3	0	15.9	29.6	0	8.0	35.2	94.4
1973	125.7	114.0	124.3	82.5	3.1	0	2.0	11.8	5.9	27.0	47.6	96.2
1974	104.6	91.0	77.0	35.8	8.6	0	0	0	127.7	136.8	32.5	85.5
1975	118.9	103.9	116.0	39.4	20.3	0.7	0	8.4	32.1	24.4	62.4	132.4
1976	121.8	68.7	116.7	27.5	11.4	6.7	5.1	9.6	17.9	9.3	29.0	86.3
1977	70.5	111.4	87.0	33.9	7.2	0	0.8	0	11.0	30.7	87.3	88.1
1978	124.9	65.4	126.1	79.2	0	0	0	113.9	13.2	4.9	121.1	138.3
1979	129.0	109.4	114.1	29.1	6.3	0.1	0.5	14.7	2.9	35.6	52.5	99.0
1980	131.4	115.1	120.2	45.1	3.5	0.1	0.1	1.5	41.0	71.4	37.8	69.0
1981	130.1	112.2	126.5	75.6	5.8	0.1	2.7	26.1	16.3	63.7	76.2	78.0
1982	130.5	74.5	122.2	86.8	10.4	0.2	0.3	20.4	21.5	57.9	109.9	66.0
1983	90.0	95.3	94.0	37.3	10.9	0.2	0.5	5.8	30.2	51.6	43.5	95.1
1984	121.0	101.7	95.9	55.8	4.7	0.2	3.4	7.6	1.7	3.8	62.4	106.9
1985	116.6	109.6	113.1	54.3	12.9	0.1	0.2	0.7	69.9	57.9	72.7	109.3
1986	89.1	113.3	120.8	58.1	7.8	0.1	0.8	9.6	13.1	13.8	48.2	83.0
1987	129.3	112.5	90.4	33.7	8.6	0	11.2	0.5	2.5	24.9	93.1	121.9
1988	126.6	94.9	116.8	87.4	4.0	0.2	0.3	1.0	32.3	30.7	51.9	116.7
1989	120.3	96.5	114.4	73.9	10.4	2.1	0	10.6	6.9	51.7	46.9	130.3
1990	126.3	104.8	71.2	54.7	3.4	24.8	0.4	2.2	17.5	41.3	101.5	99.7
1991	93.3	113.7	121.9	59.3	18.1	4.8	0	0	12.7	44.9	84.1	66.4
1992	99.2	87.9	84.2	14.8	2.7	1.5	0.4	19.5	19.1	62.8	96.8	53.6
1993	126.1	87.1	114.4	57.4	0	1.2	2.0	9.8	26.7	66.0	133.3	114.1
1994	121.7	112.2	121.6	74.9	18.8	0.3	0	1.2	9.3	50.5	81.0	127.4
1995	107.4	105.2	111.0	64.4	3.1	1.2	2.8	0	16.6	36.0	92.3	117.0
1996	121.3	112.0	128.0	42.7	16.3	0	0	12.0	24.5	54.2	61.6	115.7
1997	122.2	106.9	120.9	49.9	3.5	0	5.2	15.2	8.9	45.5	133.7	64.6
1998	102.3	123.5	97.8	15.1	0	0	0	5.6	1.7	92.2	73.6	92.7
1999	129.4	100.2	83.4	85.7	17.6	3.2	0.3	0	44.1	24.4	38.5	127.2
2000	110.4	110.2	116.8	41.7	7.2	6.0	4.4	1.7	18.6	76.4	25.2	92.6
2001	115.2	103.0	112.0	55.3	25.9	1.2	13.9	10.5	34.7	48.3	76.2	134.4
2002	132.4	107.0	115.4	102.9	32.9	0	26.1	4.7	37.4	75.9	87.3	134.1
2003	124.4	113.2	116.4	59.6	18.7	6.6	0	8.0	1.6	37.5	27.2	125.5
2004	127.0	118.3	80.4	47.0	7.6	20.5	4.2	12.0	51.6	28.9	92.4	98.4
2005	66.3	115.3	120.3	44.9	4.5	0	2.7	0	7.6	48.3	75.0	118.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	126.6	116.4	92.8	99.0	3.3	5.7	0	10.3	14.5	45.4	111.3	106.4
2007	115.8	79.0	116.3	45.1	5.3	0	9.0	0	15.2	60.7	77.0	71.2
2008	116.1	118.3	117.9	21.6	7.0	0.7	0.6	0.6	2.6	84.1	61.6	130.6
2009	89.8	108.4	85.8	37.6	5.7	0	6.2	0	11.1	32.2	129.0	121.1
2010	125.1	95.8	118.0	48.4	2.6	0	0	5.7	2.4	62.8	46.6	125.1
2011	107.6	97.6	112.7	107.3	14.4	2.9	4.4	2.6	52.2	25.3	29.0	129.3
2012	125.8	107.8	103.0	51.6	0.5	3.2	0.8	0	14.2	36.4	38.7	123.9
2013	126.3	110.2	78.9	23.5	7.2	7.1	0	11.2	1.8	38.1	66.7	130.5
2014	132.6	120.5	55.4	36.7	9.4	0	0.2	6.3	24.5	49.2	33.8	144.0
2015	128.1	97.2	104.4	104.5	8.4	2.5	1.1	7.0	10.1	52.5	74.6	136.5
2016	131.4	123.2	53.8	82.8	3.2	0	0.3	6.9	19.9	79.0	29.5	77.0
2017	134.8	119.1	117.4	60.8	40.8	0	2.2	13.8	22.7	72.9	121.9	73.4
2018	112.6	111.3	114.9	30.8	5.2	20.4	20.1	28.6	4.4	76.2	104.6	48.6
2019	131.6	113.2	86.1	45.5	8.5	0	0.5	0	0.5	58.3	133.2	140.9
2020	114.5	113.0	121.7	13.0	19.8	0.1	0	0	10.8	36.4	23.2	106.8
2021	128.1	69.1	116.4	97.8	2.9	0	0.4	0.3	11.0	28.4	71.7	103.4
2022	113.4	109.9	123.0	27.9	0	0	103.9	3.2	10.7	37.6	26.4	94.9



Estación Urubamba

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	56.7	70.6	95.0	27.9	24.4	9.6	9.5	9.5	17.3	56.5	76.5	30.8
1965	130.6	60.7	109.5	49.4	23.1	9.3	9.2	9.2	24.0	23.1	41.4	124.9
1966	63.9	96.1	40.4	18.2	43.7	9.6	8.9	17.9	55.5	115.5	83.9	58.0
1967	41.8	101.1	46.6	41.5	20.0	9.1	37.8	8.6	8.6	18.6	66.0	49.4
1968	123.2	96.4	72.9	32.8	8.4	8.3	46.2	22.2	17.8	8.2	82.7	19.1
1969	86.1	38.6	22.0	22.9	8.1	8.0	10.6	8.0	10.6	12.3	14.0	45.3
1970	72.3	20.9	74.9	40.9	7.8	7.7	9.9	7.7	21.8	38.5	35.9	135.0
1971	99.9	95.0	57.1	21.8	7.5	7.4	7.4	10.0	9.1	35.2	43.0	93.5
1972	108.8	49.0	58.1	23.2	8.5	7.1	8.8	15.3	22.8	12.8	54.2	81.2
1973	133.7	72.1	77.2	47.2	12.4	8.0	16.6	10.2	9.1	20.9	53.4	51.8
1974	54.1	76.9	70.9	31.5	12.7	10.3	0	6.3	0	0	19.0	52.0
1975	78.3	118.2	25.0	53.4	26.8	11.0	6.2	16.9	10.7	27.0	32.0	142.8
1976	75.8	38.0	87.9	31.8	13.1	7.6	5.9	5.8	12.3	5.8	44.9	100.1
1977	96.8	53.5	71.8	45.2	5.6	5.6	5.6	5.5	5.5	43.1	67.6	37.8
1978	138.2	64.9	44.6	30.4	21.0	5.3	5.3	5.2	13.2	12.5	38.6	88.6
1979	97.2	46.7	52.2	13.6	7.4	5.0	4.9	10.3	26.8	6.8	36.5	29.7
1980	66.4	85.0	100.5	24.4	1.4	6.2	0.1	2.3	3.2	60.1	46.8	70.1
1981	86.4	65.6	59.7	50.7	0.6	3.1	23.8	10.0	77.8	43.9	32.6	56.0
1982	105.2	61.0	102.2	51.4	19.2	43.7	5.3	6.6	16.1	44.8	70.2	51.6
1983	89.8	50.4	45.0	23.5	1.5	2.7	0.9	3.6	1.5	28.3	25.1	77.8
1984	31.5	70.1	50.4	37.7	3.5	1.1	3.4	26.4	7.0	22.2	63.7	66.0
1985	71.5	85.0	61.5	36.1	5.3	10.0	0.1	2.0	15.8	40.6	67.4	103.6
1986	55.8	79.0	76.7	39.0	1.2	0.1	2.8	6.9	1.4	2.3	42.3	86.6
1987	134.8	70.8	53.3	1.9	0.1	0.7	17.3	2.5	4.3	20.5	74.7	87.3
1988	96.8	69.8	104.6	39.7	6.2	2.2	2.2	2.2	16.9	24.3	23.8	78.7
1989	90.9	80.4	92.5	45.9	13.5	10.2	2.3	1.8	24.9	41.9	23.5	88.0
1990	118.0	88.2	24.3	30.4	6.8	36.4	1.6	9.8	6.7	47.3	39.8	59.2
1991	47.1	110.7	73.6	35.7	3.1	10.0	0.1	0.4	12.7	29.5	72.6	50.3
1992	84.3	68.4	36.3	9.3	1.0	36.2	1.0	28.8	2.2	20.5	53.1	24.3
1993	112.3	72.2	50.8	34.7	2.4	0.7	2.8	25.0	4.1	26.7	69.3	105.0
1994	102.4	84.6	96.2	30.5	3.5	0.3	0	0	8.7	45.1	25.9	132.1
1995	63.1	36.8	70.9	9.6	2.0	0.9	0.3	0.1	22.0	9.8	47.8	83.1
1996	76.9	67.3	43.9	46.5	11.3	0.1	0	9.8	4.0	30.2	48.2	63.9
1997	76.7	108.1	85.3	6.9	3.6	0.3	0	6.6	4.8	8.1	62.9	73.2
1998	53.7	72.2	25.6	9.3	2.9	0	0	0	0.5	20.9	48.4	45.7
1999	122.9	120.9	64.7	28.2	16.1	0	0	0	22.2	13.8	23.0	123.7
2000	135.4	91.2	85.6	4.8	4.7	7.0	0	0	13.8	62.0	16.8	74.1
2001	131.6	84.9	100.2	5.2	6.4	0	14.8	9.5	7.9	70.7	62.0	59.9
2002	124.0	115.5	76.0	47.8	3.4	2.6	60.3	0	0	62.0	49.6	133.0
2003	94.3	71.7	121.7	10.3	1.6	5.7	0	15.3	0	28.9	29.7	91.6
2004	121.0	84.3	72.4	5.3	7.5	27.6	18.5	7.3	3.1	36.8	31.4	75.6
2005	44.4	93.8	59.5	31.4	1.8	0	0	0	8.3	7.5	47.7	78.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	108.3	89.3	65.4	29.9	0	0	0	0.3	0.3	46.4	60.9	78.2
2007	53.0	71.1	78.8	38.5	0.7	0	0	0	0	53.4	57.0	70.2
2008	94.2	79.1	68.1	0.4	2.9	0	0	0	0	31.2	99.9	117.0
2009	133.1	109.7	59.2	6.4	1.8	0	0	0	4.3	0	123.7	72.2
2010	135.0	120.5	96.5	8.4	0	0	0	3.3	0.1	41.7	18.9	109.6
2011	95.4	123.4	76.3	39.6	7.5	12.8	10.5	0	23.0	33.7	26.6	107.2
2012	63.7	119.1	52.0	12.6	0	0	0	0	11.7	2.5	60.9	128.4
2013	121.9	120.3	83.0	0	0	0	0	14.8	0	65.9	107.5	130.1
2014	118.1	63.9	46.4	26.5	4.2	0	0	0	0.1	50.5	24.4	99.5
2015	125.0	85.4	35.9	22.1	0	0	1.4	0	0	8.7	23.0	110.4
2016	62.9	112.4	50.5	16.3	0	0	0	0	0	48.1	51.7	107.1
2017	71.0	74.9	53.2	36.4	0	0	0	4.0	0	31.6	62.8	48.0
2018	81.5	121.0	78.1	2.0	0	19.5	9.4	10.6	0	60.5	42.7	57.4
2019	85.3	88.1	96.6	11.9	1.7	0	0	0	0	47.0	82.3	137.6
2020	109.1	115.8	81.0	20.4	0	0	0	0	0	12.2	23.6	129.5
2021	66.4	62.8	56.2	18.2	0	0	0	0.1	0	22.6	71.5	42.7
2022	119.9	90.6	73.6	7.3	0	0	0	0.1	0	0	24.1	40.3



Anexo F. Tabla de Evapotranspiración Potencial Mensual media areal

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	88.7	92.7	93.2	34.5	24.0	6.6	14.4	2.0	25.3	28.4	66.1	61.9
1965	123.4	102.9	117.4	42.3	2.0	0.8	55.9	1.8	36.2	48.8	55.1	128.0
1966	114.6	115.3	75.3	16.4	22.1	2.4	44.6	3.3	42.5	98.8	92.5	117.2
1967	75.1	110.5	117.8	26.6	10.4	3.4	78.3	21.7	26.5	56.7	44.0	127.3
1968	123.4	113.9	116.8	29.7	1.5	1.8	97.5	7.1	16.1	40.7	132.2	62.9
1969	130.0	116.4	121.6	64.8	3.6	3.6	41.5	3.8	17.5	71.6	57.9	76.8
1970	126.9	117.0	120.0	63.2	5.9	1.0	22.7	6.9	66.8	66.3	35.8	128.4
1971	130.8	101.1	70.9	64.1	5.4	2.7	1.2	2.1	1.2	24.1	131.2	101.6
1972	123.9	99.6	109.7	46.4	5.1	0.9	19.6	17.0	6.4	25.4	43.5	107.9
1973	126.7	113.6	123.2	98.1	17.4	2.4	61.5	15.3	24.2	47.1	77.7	97.5
1974	120.4	98.7	123.3	59.9	7.6	4.0	1.1	52.3	114.2	70.4	42.4	112.8
1975	125.1	109.5	113.0	36.7	16.3	4.3	2.0	5.9	39.4	35.3	62.7	131.7
1976	122.1	91.6	119.8	36.7	24.1	6.5	15.9	7.8	33.6	24.3	35.6	85.8
1977	146.0	112.5	118.9	39.4	4.2	0.5	21.5	1.3	27.0	46.6	126.9	110.8
1978	124.9	119.7	125.9	54.6	7.7	0.7	2.9	43.1	23.5	11.6	132.8	136.8
1979	129.3	98.0	115.2	49.8	5.8	0.9	6.6	4.0	4.8	21.5	84.3	106.1
1980	131.2	118.5	108.3	30.5	4.8	0.5	2.3	5.7	32.0	62.2	43.8	83.6
1981	129.1	114.1	128.2	69.2	5.8	4.2	15.6	7.9	63.5	64.3	41.9	109.4
1982	128.1	94.5	115.2	67.9	12.1	5.3	7.1	12.5	27.8	58.9	116.8	76.6
1983	124.7	108.2	85.4	37.3	4.7	2.1	2.0	9.7	21.4	30.8	30.7	84.9
1984	121.7	95.2	96.9	57.0	7.4	2.4	11.0	4.8	1.9	26.1	84.2	114.4
1985	132.9	111.0	91.8	47.7	21.0	3.2	2.1	2.5	71.8	86.8	78.8	117.9
1986	125.9	115.6	117.7	53.1	7.3	0.1	3.3	2.5	5.4	10.5	55.3	118.2
1987	128.4	95.6	73.1	27.9	5.1	0.6	14.0	0.7	4.8	120.4	137.5	129.3
1988	125.0	108.4	116.9	83.6	7.6	0.6	2.8	1.7	18.9	30.1	43.4	127.7
1989	119.9	107.5	118.9	59.8	7.6	2.4	0.7	15.6	17.6	41.4	37.0	119.9
1990	125.1	121.4	105.0	51.2	6.7	20.1	2.6	4.0	9.1	58.9	89.4	118.8
1991	101.5	117.7	124.2	46.9	22.7	18.3	2.3	2.1	14.9	55.6	55.3	100.3
1992	116.7	80.9	61.2	16.2	3.2	8.4	2.7	21.7	9.8	50.8	100.3	68.2
1993	130.1	82.7	109.5	58.9	5.5	5.7	6.8	23.2	23.2	61.5	112.6	131.1
1994	123.8	111.2	120.5	62.2	13.2	2.6	2.1	3.7	14.7	49.0	73.5	136.0
1995	117.0	115.4	113.1	35.7	8.0	1.6	3.5	1.8	34.3	44.9	108.8	107.6
1996	127.4	117.7	119.3	48.0	11.1	1.4	5.7	26.7	22.7	66.9	80.3	130.3
1997	122.6	107.7	121.6	46.2	8.5	1.3	3.2	15.9	33.7	53.9	136.0	110.5
1998	125.2	127.8	97.1	28.5	1.5	4.0	1.1	4.4	5.6	88.6	91.8	68.9
1999	130.9	106.2	111.9	64.6	9.0	1.4	1.9	1.1	29.2	36.5	26.0	110.4
2000	123.6	112.0	109.2	25.4	5.8	7.5	4.7	7.6	16.2	113.1	56.8	120.8
2001	114.5	105.7	113.1	48.9	30.0	3.9	11.9	11.4	12.9	45.9	50.2	129.9
2002	134.0	107.1	116.7	79.4	20.9	8.0	17.5	8.0	31.5	83.5	92.1	131.7
2003	128.8	114.8	116.1	42.8	13.0	6.0	1.0	13.8	10.3	30.4	30.6	118.9
2004	126.8	118.9	84.8	43.3	9.5	12.3	10.2	18.1	44.9	33.5	75.2	118.7
2005	71.7	116.1	115.7	38.9	2.1	0.2	2.1	2.1	4.6	55.1	81.6	102.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2006	125.9	118.7	113.5	79.3	1.2	7.3	0.0	9.7	32.9	59.1	86.6	136.7
2007	128.9	97.3	117.0	58.9	9.1	0.5	4.6	0.9	19.9	52.4	76.2	86.0
2008	117.3	113.4	88.3	20.8	7.8	4.0	0.3	4.7	7.8	63.6	67.2	131.4
2009	117.7	110.5	79.7	33.0	3.3	0.0	6.9	0.5	12.3	24.5	135.4	123.8
2010	127.8	115.9	124.9	29.5	4.6	1.0	1.3	4.2	6.2	44.5	39.7	130.8
2011	117.2	100.4	114.1	66.9	9.2	3.5	7.3	2.6	46.4	38.4	40.2	130.2
2012	128.8	109.6	118.8	72.3	2.3	3.1	0.4	1.2	20.8	26.5	78.1	126.7
2013	128.9	110.1	105.1	31.6	8.2	6.1	2.3	11.7	8.3	70.9	76.9	131.2
2014	130.6	120.4	73.3	34.5	6.8	0.4	2.8	9.8	22.5	68.7	37.7	139.0
2015	128.8	107.9	99.6	89.2	13.7	1.3	4.6	4.4	5.0	16.3	144.7	138.7
2016	118.5	125.4	62.3	62.8	5.8	0.8	5.0	6.2	11.5	77.7	36.9	78.0
2017	129.8	111.6	117.8	66.1	22.0	0.7	0.7	9.4	15.1	47.1	69.9	101.9
2018	127.4	112.1	116.9	31.4	1.7	12.1	21.8	9.1	8.7	76.5	75.3	98.2
2019	127.4	111.6	121.5	41.9	8.9	1.9	1.7	0.2	4.8	46.6	131.2	139.2
2020	132.4	113.3	124.2	24.2	10.6	1.4	0.5	1.8	18.9	46.8	41.0	116.3
2021	128.9	94.3	119.1	79.9	5.3	0.9	0.6	14.6	13.8	31.6	87.1	130.0
2022	128.5	115.7	124.4	37.8	2.1	0.3	43.1	4.8	9.1	27.0	32.7	102.1

