



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS
HIDROLÓGICOS LUTZ-SCHOLZ, GR2M Y ABCD PARA
ESTIMAR EL CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA UNIDAD
HIDROGRÁFICA DEL RÍO AYAVIRI, 1981- 2016”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FELIX HUAMAN ATAYUPANQUI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO - PERÚ

2023



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS LUTZ-SCHOLZ, GR2M Y ABCD PARA ESTIMAR EL CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL RÍO AYAVIRI, 1981- 2016

AUTOR

FELIX HUAMAN ATAYUPANQUI

RECuento DE PALABRAS

43136 Words

RECuento DE CARACTERES

222247 Characters

RECuento DE PÁGINAS

264 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

13.0MB

FECHA DE ENTREGA

May 19, 2023 8:44 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 19, 2023 8:47 PM GMT-5

● 19% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 12% Base de datos de trabajos entregados
- 8% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)



Firmado digitalmente por BELIZARIO
QUISPE German FAU 20145496170
soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 19.05.2023 21:11:52 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

A nuestro creador dios padre todopoderoso, simiente divina que habita en nuestro fuero íntimo, por haberme guiado por la ruta del saber y del bien. por su amor infinito y por darnos la existencia, sabiduría y luz en nuestras vidas y ser el amigo incondicional que siempre se encuentra a nuestro lado.

A mi gran padre, don Francisco Huaman Mamani y a mi adorada madre doña Eusebia Atayupanqui Cutipa, por el permanente e inmensurable apoyo, con todo cariño e inmensa gratitud, quienes con su aliento, paciencia, por sus sabios consejos y por su gran esfuerzo para forjar a sus hijos, que hicieron posible el logro de mi noble profesión.

A mis hermanos:

Bernardo y Cesar con mucho afecto y cariño, por su contribución a mi buena formación profesional.

Felix Huaman Atayupanqui



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano mi alma mater de siempre..., muy en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por haberme formado profesionalmente.

Al D.Sc. German Belizario Quispe, director/asesor de la presente Tesis, por su acertado asesoramiento, así mismo por su preocupación y desinteresado apoyo constante para que se culmine la presente Investigación.

Mi sincero agradecimiento a todos los Docentes de la Facultad, que en forma desinteresada me impartieron sus conocimientos a lo largo de mi formación profesional contribuyendo al logro de este objetivo.

A mis compañeros de la escuela profesional de ingeniería agrícola, por su aliento y compañerismo de cada uno de ellos.

A todas aquellas personas y amigos que directa e indirectamente han contribuido en la realización del presente trabajo de investigación.

Felix Huaman Atayupanqui



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 19

ABSTRACT..... 20

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 22

1.1.1 Problema general 24

1.1.2 Problemas específicos 24

1.2 HIPÓTESIS..... 24

1.2.1 Hipótesis general 24

1.2.2 Hipótesis específicas 24

1.3 JUSTIFICACIÓN..... 25

1.4 OBJETIVOS 26

1.4.1 Objetivo general 26

1.4.2 Objetivos específicos 26

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES..... 27

2.1.1 Antecedentes a nivel internacional 27



2.1.2	Antecedentes a nivel nacional	28
2.1.3	Antecedentes a nivel local	33
2.2	LA HIDROLOGÍA	34
2.3	CICLO HIDROLÓGICO	35
2.4	COMPONENTES DEL PROCESO HIDROLÓGICO	38
2.4.1	Precipitación	38
2.4.2	Intercepción	39
2.4.3	Evaporación	39
2.4.4	Evapotranspiración	40
2.4.5	Infiltración	41
2.4.6	Almacenamiento	41
2.4.7	Esorrentía	42
2.4.8	Balance hídrico de una cuenca	45
2.5	CUENCA HIDROGRÁFICA	47
2.6	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA	48
2.7	CAUDAL	49
2.8	MODELO HIDROLÓGICO	49
2.8.1	Clasificación de los modelos hidrológicos	51
2.8.2	Proceso de modelación hidrológica	59
2.9	REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS PROPUESTOS.....	63
2.9.1	Modelo determinístico y estocástico de Lutz Scholz	64
2.9.2	Modelo hidrológico GR2M	67
2.9.3	Modelo hidrológico abcd.....	71



2.10 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTES	75
2.10.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E).....	75
2.10.2 Coeficiente de calibración (r)	76
2.10.3 Criterio de Schultz (D)	77
2.10.4 Raíz del error cuadrático medio (RMSE).....	78
2.10.5 Porcentaje de sesgo (PBIAS).....	79
2.10.6 Razón RMSE- desviación estándar de las observaciones (RSR)	79
 CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS 	
3.1 ZONA DE ESTUDIO.....	81
3.1.1 Ubicación geográfica.....	81
3.1.2 Ubicación política.....	82
3.1.3 Ubicación hidrográfica	82
3.1.4 Límites hidrográficos.....	82
3.2 ACCESIBILIDAD	83
3.3 MATERIALES	84
3.3.1 Equipos	84
3.3.2 Software.....	84
3.4 DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN	84
3.4.1 Información cartográfica	84
3.4.2 Información pluviométrica	85
3.4.3 Información de temperatura	87
3.4.4 Información hidrométrica.....	88
3.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	90
3.5.1 Recopilación de la información disponible	90



3.5.2	Análisis cartográfico de la unidad hidrográfica.....	96
3.5.3	Análisis estadístico de la información hidrometeorológica.....	114
3.5.4	Determinación de la precipitación media areal de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	122
3.5.5	Aplicación del modelo hidrológico de Lutz Scholz	124
3.5.6	Aplicación del modelo hidrológico de GR2M	141
3.5.7	Aplicación del modelo hidrológico de abcd.....	145
3.5.8	Determinación de la eficiencia del modelo hidrológico Lutz Scholz, GR2M y abcd.....	147

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA	149
4.1.1	Análisis pluviométrico.....	149
4.1.2	Análisis de temperatura	165
4.1.3	Análisis hidrométrico	168
4.2	PRECIPITACIÓN MEDIA AREAL DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA... 172	
4.3	SIMULACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	176
4.3.1	Aplicación del modelo hidrológico de Lutz Scholz	176
4.3.2	Aplicación del modelo hidrológico de GR2M	196
4.3.3	Aplicación del modelo hidrológico de abcd.....	205
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES SIMULADOS	211
4.4.1	Análisis comparativo de modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd.....	211
4.4.2	Eficiencia del modelo hidrológico Lutz Scholz, GR2M y abcd.....	216
V.	CONCLUSIONES.....	218



VI. RECOMENDACIONES	219
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	220
ANEXOS.....	228

Área : Ingeniería y Tecnología

Tema : Modelos hidrológicos Lutz-Scholz, GR2M y abcd para estimar el caudal medio mensual

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 25 de mayo de 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico del agua	37
Figura 2. Representación del sistema hidrológico global mediante un diagrama de bloques	38
Figura 3. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual	41
Figura 4. Zonas y procesos del agua subsuperficial	44
Figura 5. Relación entre la precipitación y el escurrimiento total	45
Figura 6. Cuenca hidrográfica	48
Figura 7. Representación esquemática de la operación de un sistema	50
Figura 8. Clasificación de modelos hidrológicos	52
Figura 9. Modelos hidrológicos según su distribución espacial	58
Figura 10. Proceso de modelación hidrológica.....	59
Figura 11. Resumen esquemático del problema de calibración del modelo.....	61
Figura 12. Comparación entre los conceptos de exactitud y precisión de los datos.....	62
Figura 13. Arquitectura del modelo GR2M.....	68
Figura 14. Representación simplificada de una cuenca hidrográfica utilizada en el modelo abcd	72
Figura 15. Estructura del modelo abcd	74
Figura 16. Ubicación geográfica del área de estudio.....	81
Figura 17. Ubicación hidrográfica del área de estudio	83
Figura 18. Portal de descarga del DEM.....	85
Figura 19. Portal de descarga del producto PISCO en IRI	86
Figura 20. Precipitación mensual del producto PISCOpm v.2.1 a nivel nacional.....	86
Figura 21. Temperatura mínima mensual del producto PISCOt v.1.1 a nivel nacional	88



Figura 22. Temperatura máxima mensual del producto PISCOt v.1.1 a nivel nacional	88
Figura 23. Esquema metodológico de la presente investigación.....	90
Figura 24. Ubicación de las imágenes DEM descargadas	91
Figura 25. Ubicación de las estaciones pluviométricas e hidrométrica para la unidad hidrográfica del río Ayaviri	94
Figura 26. Delimitación de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	96
Figura 27. Tipos de curva hipsométrica	103
Figura 28. Curva hipsométrica - Unidad hidrográfica del río Ayaviri	104
Figura 29. Polígono de frecuencias – Unidad hidrográfica del río Ayaviri.....	105
Figura 30. Perfil longitudinal del cauce principal – Unidad hidrográfica del río Ayaviri	112
Figura 31. Representación gráfica de un histograma.....	115
Figura 32. Partes de un diagrama de caja	116
Figura 33. Polígonos de Thiessen	123
Figura 34. Interfaz del modelo hidrológico GR2M	145
Figura 35. Interfaz del modelo hidrológico abcd.....	147
Figura 36. AED histogramas de precipitación mensual PISCOpm v.2.1 periodo 1981- 2016.....	151
Figura 37. AED histogramas de precipitación mensual PISCOpm v.2.1 Multi-estaciones periodo 1981-2016	154
Figura 38. Diagrama de cajas (box plot) de la serie mensual de precipitaciones Periodo: 1981 – 2016.....	155
Figura 39. Vector regional de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	159
Figura 40. Gráfico de acumuladas de las estaciones de estudio con respecto al Vector	160



Figura 41. Variación mensual de temperatura máxima – Promedio multianual	166
Figura 42. Variación mensual de temperatura mínima – Promedio multianual	168
Figura 43. Serie mensual de caudales medios de la estación hidrométrica puente Ayaviri	169
Figura 44. Serie anual de caudales medios de la estación hidrométrica puente Ayaviri	169
Figura 45. Diagrama de cajas de caudales mensuales estación hidrométrica Puente Ayaviri periodo 1981-2016.....	170
Figura 46. Polígono de Thiessen de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.....	173
Figura 47. Determinación de la precipitación media en la unidad hidrográfica del río Ayaviri con el software Hydraccess	174
Figura 48. Hidrograma precipitación media de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	176
Figura 49. Variación mensual de temperatura media – Promedio multianual	178
Figura 50. Ecuación polinómica de la precipitación efectiva.....	182
Figura 51. Calibración de caudales generados para un año promedio modelo Lutz Scholz	193
Figura 52. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo Lutz Scholz	194
Figura 53. Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo Lutz Scholz	195
Figura 54. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo Lutz Scholz	195
Figura 55. Determinación de la ETP en la unidad hidrográfica del río Ayaviri con el software Hydraccess	198



Figura 56. Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso calibración modelo GR2M.....	201
Figura 57. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo GR2M	202
Figura 58. Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo GR2M	204
Figura 59. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo GR2M	204
Figura 60. Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso calibración modelo abcd	207
Figura 61. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo abcd	207
Figura 62. Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo abcd	209
Figura 63. Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo abcd	209
Figura 64. Comparación de hidrogramas de los modelos con la estación hidrológica Puente Ayaviri	212
Figura 65. Comparación de las series simuladas y observadas multimensuales – Calibración	213
Figura 66. Comparación de las series simuladas y observadas multimensuales – Validación	213
Figura 67. Comparación de los modelos e indicadores estadísticos de eficiencia	217
Figura 68. Análisis de datos de la estación Ayaviri.....	231
Figura 69. Análisis de datos de la estación Chuquibambilla	231



Figura 70. Análisis de datos de la estación La Raya	231
Figura 71. Análisis de datos de la estación Llalli	232
Figura 72. Análisis de datos de la estación Nuñoa	232
Figura 73. Análisis de datos de la estación Orurillo	232
Figura 74. Análisis de datos de la estación Quillisani	233
Figura 75. Análisis de datos de la estación Santa Rosa.....	233



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR2M	71
Tabla 2. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe	76
Tabla 3. Valores del coeficiente de correlación	77
Tabla 4. Valores referenciales del criterio de Schultz	78
Tabla 5. Valores de PBIAS	79
Tabla 6. Valores de RSR.....	80
Tabla 7. Acceso al área de estudio	84
Tabla 8. Fuentes de información.....	89
Tabla 9. Ubicación de las estaciones pluviométricas (Unidad hidrográfica del río Ayaviri)	93
Tabla 10. Ubicación de la estación hidrométrica Puente Ayaviri.....	95
Tabla 11. Clasificación propuesta para las cuencas.....	98
Tabla 12. Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius	100
Tabla 13. Rangos aproximados del factor de forma	101
Tabla 14. Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.....	113
Tabla 15. Metodología del modelo de Lutz Scholz	125
Tabla 16. Límite superior para la precipitación efectiva	130
Tabla 17. Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva.....	130
Tabla 18. Lámina de agua acumulada en los tres tipos de almacén hídrico	135
Tabla 19. Coeficientes de almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (Valores de “ai” en %).....	137
Tabla 20. Radiación solar extraterrestre en mm/día	143
Tabla 21. Resultados del análisis de correlación de la información pluviométrica.....	149
Tabla 22. Coeficientes de correlación con respecto al Vector Regional	161



Tabla 23. Estadísticos de la prueba Cusum a la serie mensual de precipitaciones	162
Tabla 24. Estadísticos de la prueba Rank Sum a la serie mensual de precipitaciones	163
Tabla 25. Estadísticos de la prueba Mann Kendall a la serie mensual de precipitaciones	164
Tabla 26. Temperatura máxima (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri	166
Tabla 27. Temperatura mínima (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri.....	167
Tabla 28. Distribución de datos de caudales medios (m ³ /s) metodología de los percentiles	170
Tabla 29. Resultados de análisis de saltos y tendencias de la serie mensual de caudales	172
Tabla 30. Precipitación media de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	175
Tabla 31. Temperatura media mensual (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri ...	177
Tabla 32. Resultados de la evapotranspiración potencial unidad hidrográfica del río Ayaviri	179
Tabla 33. Resultados del coeficiente de escurrimiento – Método Turc.....	179
Tabla 34. Resultados del coeficiente de escurrimiento– Método Misión Alemana ...	180
Tabla 35. Precipitación efectiva según el Bureau of Reclamation (USBR)	181
Tabla 36. Coeficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva.....	182
Tabla 37. Resultados de la precipitación efectiva mensual (mm)	183
Tabla 38. Retención de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.....	184
Tabla 39. Resultados del gasto de la retención mensual (mm/mes)	185
Tabla 40. Resultados del abastecimiento de la retención mensual (mm/mes).....	186
Tabla 41. Resultados generados y aforados de caudales mensuales para el año promedio (m ³ /s).....	187



Tabla 42. Precipitación efectiva (mm) generada para la unidad hidrográfica del río Ayaviri	188
Tabla 43. Números aleatorios generados con distribución normal (0,1)	189
Tabla 44. Datos de la variable dependiente e independiente	190
Tabla 45. Descargas medias mensuales generados (mm) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con Lutz Scholz	191
Tabla 46. Descargas medias mensuales generados (m ³ /s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con Lutz Scholz	192
Tabla 47. Resultados del test estadístico del modelo Lutz Scholz	196
Tabla 48. Período de calibración y validación del área de estudio	197
Tabla 49. Evapotranspiración mensual de la unidad hidrográfica del río Ayaviri	199
Tabla 50. Proceso de calibración del modelo hidrológico GR2M.....	200
Tabla 51. Proceso de validación del modelo hidrológico GR2M.....	203
Tabla 52. Descargas medias mensuales generados (m ³ /s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con GR2M	205
Tabla 53. Parámetros del modelo hidrológico abcd – calibración.....	206
Tabla 54. Parámetros del modelo hidrológico abcd – validación	208
Tabla 55. Descargas medias mensuales generados (m ³ /s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con abcd.....	210
Tabla 56. Caudales mensuales simulados y observados de los modelos hidrológicos	215
Tabla 57. Resumen indicadores estadísticos de eficiencia	217



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AED	: Análisis Exploratorio de Datos
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
CUSUM	: Suma Acumulada
ETP	: Evapotranspiración Potencial
DED	: Desviación Estándar de Desvíos
IGN	: Instituto Geográfico Nacional
DEM	: Modelo Digital de Elevación
FAO	: Food and Agriculture Organization
MVR	: Método del Vector Regional
IRI	: International Research Institute for Climate and Society
netCDF	: Formulario de datos comunes en red
ALOS	: Advanced Land Observing Satellite
PALSAR	: Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar
OMM	: Organización Meteorológica Mundial
PISCO	: Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
PISCOpm	: PISCO precipitación mensual
PISCOt	: PISCO temperatura
TDPS	: Titicaca, Desaguadero, Poopó, Salar de Coipasa
USBR	: United States Bureau of Reclamation
GR2M	: Global rainfall-runoff two parameter model
CEMAGREF	: Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia.



RESUMEN

Uno de los inconvenientes más conocidos para emplear la modelación hidrológica distribuida para las regiones alto-andinas, es la escasa información hidrometeorológica, geológica, cobertura vegetal y uso de suelos; en esta circunstancia, la utilización de modelos simplificados o agregados se muestra como una opción útil para estimar la disponibilidad hídrica a nivel mensual, ya que la modelación hidrológica es la base para la gestión integral del recurso hídrico. La presente investigación tiene como objetivo realizar el análisis comparativo de la aplicación de los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd, para conocer el modelo hidrológico más eficiente que estime el caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, a partir de información de la estación hidrométrica puente Ayaviri, área de la unidad hidrográfica, precipitación media mensual, precipitación efectiva mensual y evapotranspiración mensual; cabe indicar que la información respecto a la precipitación y temperatura, se obtuvo del producto PISCO–SENAMHI, del periodo 1981-2016; para la modelación hidrológica se efectuó la calibración 1981-2004 y la validación 2005-2016, para la aplicación de los modelos hidrológicos se ha evaluado el comportamiento y se detectaron los parámetros más significativos de cada modelo hidrológico, luego a partir de los modelos determinados se utilizaron las pruebas de ajuste, siendo estos la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), el coeficiente de calibración (r), el RMSE (raíz del error cuadrático medio), el PBIAS (sesgo porcentual) y el RSR, se lograron obtener los siguientes resultados de eficiencia de Nash-Sutcliffe, para la etapa de calibración y validación, el modelo Lutz Scholz de 0.97 y 0.58, GR2M de 0.59 y 0.71 y abcd de 0.60 y 0.58, concluyendo que en el orden descendente la eficiencia de los modelos hidrológicos es $GR2M > Lutz\ Scholz > abcd$.

Palabras clave: Calibración, caudal medio mensual, modelo hidrológico, precipitación-escorrentía, simulación.



ABSTRACT

One of the best-known drawbacks for using distributed hydrological modeling for the high-Andean regions is the scarce hydrometeorological, geological, vegetation cover and land use information; In this circumstance, the use of simplified or aggregated models appears as a useful option to estimate water availability on a monthly basis, since hydrological modeling is the basis for comprehensive water resource management. The objective of this research is to carry out the comparative analysis of the application of the hydrological models Lutz Scholz, GR2M and abcd, to find out the most efficient hydrological model that estimates the average monthly flow in the hydrographic unit of the Ayaviri river, based on information from the Ayaviri bridge hydrometric station, area of the hydrographic unit, average monthly precipitation, effective monthly precipitation and monthly evapotranspiration; It should be noted that the information regarding precipitation and temperature was obtained from the PISCO-SENAMHI product, from the period 1981-2016; For the hydrological modeling, the 1981-2004 calibration and the 2005-2016 validation were carried out, for the application of the hydrological models the behavior has been evaluated and the most significant parameters of each hydrological model were detected, then from the determined models used the fit tests, these being the Nash-Sutcliffe efficiency (E), the calibration coefficient (r), the RMSE (root mean square error), the PBIAS (percentage bias) and the RSR, it was possible to obtain the results following Nash-Sutcliffe efficiency results, for the calibration and validation stage, the Lutz Scholz model of 0.97 and 0.58, GR2M of 0.59 and 0.71 and abcd of 0.60 and 0.58, concluding that in descending order the efficiency of the hydrological models is GR2M > Lutz Scholz > abcd.

Keywords: Calibration, average monthly flow, hydrological model, precipitation-runoff, simulation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Un aspecto principal de la investigación hidrológica es comprender la interacción entre los diferentes procesos y componentes físicos del ciclo hidrológico, con ello realizar pronósticos confiables como base en la gestión del uso de agua y proponer alternativas de solución a los problemas que se presenten, para ello el método más utilizado es la modelación hidrológica, que representa el ciclo hidrológico del agua y las variables externas dentro de una unidad hidrográfica a través de expresiones matemáticas analíticas basadas en el principio del balance hídrico. Asimismo, la modelación hidrológica tiene alcances variados, incluyendo métodos con múltiples aplicaciones, algunas más complejas que otras, según los requerimientos de la realidad del planeta.

Dado que la hidrología es la ciencia que se encuentra expuesta a un alto grado de incertidumbre, limitada por la carencia de fuentes de información, mediciones deficientes, aleatoriedad climatológica, intervención humana y otros factores, por tal razón es inherente al proceso de modelación la aplicación de las pruebas de calibración, optimización y validación, que demuestren las hipótesis planteadas referentes al comportamiento hidrológico de una unidad hidrográfica.

En la realidad peruana, mayormente la información hidrometeorológica es deficiente y actualmente se encuentra en un proceso de mejora, especialmente en cuencas alto-andinas, por ello es primordial incidir en la utilización de modelos hidrológicos simplificados o agregados que operan con pocas variables y adaptarlos a estos escenarios.

La presente investigación se lleva a cabo el análisis de los caudales calculados por los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd, para luego determinar cuál de ellos se ajusta mejor a las condiciones que presenta la unidad hidrográfica del río Ayaviri para



realizar pronósticos en el horizonte temporal cercano. Para tal motivo se realizó la modelación hidrológica en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, y se comprobó mediante pruebas estadísticas el modelo hidrológico que describe mejor el comportamiento hidrológico de la unidad hidrográfica, a través del análisis de una serie de tiempo establecida.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El recurso hídrico atraviesa una grave crisis en todo el mundo, que aún no ha sido resuelta, el principal problema es que la cantidad disponible es constante o disminuye, mientras que la población aumenta cada año, debido al crecimiento de la población, se pronostica que para el 2030, muchas regiones hidrológicas de gran extensión enfrentarán una disponibilidad de agua que será extremadamente baja (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012). Razones suficientes para efectuar el estudio sobre la disponibilidad del recurso hídrico, en la unidad hidrográfica del río Ayaviri para su respectiva gestión.

En las cuencas altas de la sierra del Perú, sobre todo en las partes más alejadas de las áreas urbanas, no existen muchas estaciones hidrométricas, la red de estaciones meteorológicas es deficiente y su distribución y lejanía dificulta los trabajos de observación, monitoreo y toma de datos; asimismo, la información hidrogeológica y de usos de suelo no es representativa y se manifiesta como una limitación para todo tipo de estudios hidrológicos de calidad, que permitan tomar las decisiones acertadas. Sin embargo, existen metodologías de modelación que simplifican los procesos del ciclo hidrológico, y que requieren pocos parámetros de entrada y que a pesar de ello tienen en su haber experiencias satisfactorias en muchos lugares, varios de los cuales comparten ciertas características similares con nuestras cuencas alto-andinas (Cruz Adrianzén & Romero Callo, 2018, p. 4).



En las regiones de nuestro país, las cuencas altas andinas no presentan una apropiada caracterización acerca de la hidroclimatología de un territorio de tan compleja diversidad climática. Desde el enfoque hidrológico cuando una cuenca no cuenta de estaciones de aforo de caudales se utiliza diversos métodos y modelos para estimarlas a partir de factores geográficos y meteorológicos, las cuales permiten generar los caudales a nivel mensual y anual (Quispe Sánchez, 2013, p. 11).

La planificación de la gestión del agua es una herramienta importante en el desarrollo sostenible de las unidades hidrográficas, pues con ella es posible obtener una visión integral a futuro referente a la oferta hídrica en diversos escenarios.

En la región Puno, surge el mismo problema acerca del desconocimiento de la oferta hídrica en las unidades hidrográficas no aforadas, así como la escasa información hidrometeorológica disponible, que permitan la planificación y ejecución de diversos proyectos hidráulicos.

En la unidad hidrográfica del río Ayaviri, existen fuentes de agua que carecen de información de registro de caudales aforados, lo que conlleva a una deficiente planificación del recurso hídrico, afectando a los distritos de Ayaviri, Umachiri, Santa Rosa, Macari, Cupi, Llalli, Ocuvi y Palca, cuya población se dedica principalmente a la agricultura y ganadería, es por ello que para los usuarios de esta zona, la disponibilidad y calidad del agua son vitales para el desarrollo, y por ende mejorar la calidad de vida de los pobladores de la cuenca; por lo tanto, ante esta problemática, se desarrolla la comparación de la eficiencia de los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd para estimar los caudales medios mensuales del río Ayaviri, y proponer el uso del modelo hidrológico que mejor se ajusta a la cuenca de estudio.



1.1.1 Problema general

¿Cuál de los modelos hidrológicos (Lutz Scholz, GR2M y abcd) se ajusta mejor en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cuánto es la eficiencia del modelo hidrológico de Lutz Scholz en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri?
- ¿Cuánto es la eficiencia del modelo hidrológico de GR2M en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri?
- ¿Cuánto es la eficiencia del modelo hidrológico de abcd en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri?
- ¿Cuál de los modelos hidrológicos en estudio se ajusta mejor en la unidad hidrográfica del río Ayaviri?

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 Hipótesis general

El análisis comparativo de los resultados de la aplicación de los modelos hidrológicos, determina el mejor ajuste del modelo hidrológico GR2M, para la estimación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

1.2.2 Hipótesis específicas

- La eficiencia en la determinación del caudal medio mensual del modelo hidrológico de Lutz Scholz en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, ofrece un ajuste de bueno.



- La eficiencia en la determinación del caudal medio mensual del modelo hidrológico de GR2M en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, ofrece un ajuste de muy bueno.
- La eficiencia en la determinación del caudal medio mensual del modelo hidrológico de abcd en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, ofrece un ajuste de bueno.
- Los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd son eficientes en el orden que $GR2M > Lutz\ Scholz > abcd$ en la determinación de caudales medios mensuales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo y la implementación de modelos hidrológicos, con el objetivo de estimar el caudal en cuencas que no se encuentran instrumentadas, son herramientas fundamentales y válidas para determinar la disponibilidad hídrica, y por consiguiente una adecuada planificación de los recursos hídricos, que permitan a las poblaciones desarrollarse en armonía con su entorno.

En la presente investigación se realiza el análisis comparativo que permite y busca conocer qué modelo hidrológico (Lutz Scholz, GR2M y abcd) representa mejor el caudal medio mensual del río Ayaviri, utilizando los datos grillados del producto PISCO, y así proponer el uso del modelo más eficiente, para la determinación de caudales medios mensuales en fuentes hídricas no aforadas dentro de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, teniendo en cuenta que los modelos hidrológicos en estudio, cuentan con un número reducido de parámetros que los hace más accesibles a la información requerida, a comparación con otros modelos hidrológicos (WEAP, SWAT, Tetis, Temez y otros).



Por ello los modelos hidrológicos son herramientas que ayudan a la planificación del recurso hídrico, explicando el comportamiento del ciclo hidrológico y balance hídrico de las cuencas en la actualidad y en el futuro.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Realizar el análisis comparativo de la aplicación de los modelos hidrológicos para conocer el modelo hidrológico más eficiente que estime el caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia del modelo hidrológico de Lutz Scholz, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.
- Determinar la eficiencia del modelo hidrológico de GR2M, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.
- Determinar la eficiencia del modelo hidrológico de abcd, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.
- Comparar la eficiencia de los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes a nivel internacional

Gallo Llumigusin y Iza Jiménez (2018), en la investigación: “Modelamiento con SWAT y GR2M para la subcuenca del río Guayllabamba”; de la Universidad Técnica de Cotopaxi - Ecuador; donde consideró como objetivo general modelar con SWAT y GR2M para la subcuenca del río Guayllabamba; llegando a la siguiente conclusión: El modelo GR2M en la simulación de caudales alcanzó una eficiencia satisfactoria, con un coeficiente de Nash de 0.62 y 0.66 y un coeficiente de determinación R^2 de 0.63 y 0.66, en la calibración y validación respectivamente, por otro lado el modelo SWAT presenta un ajuste insuficiente en la simulación de caudales, con un coeficiente de Nash de 0.19 y 0.07, y un coeficiente de determinación R^2 de 0.36 y 0.34, en la calibración y validación.

Rincón Achury (2019), en la investigación: “Aplicación de los modelos Lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del río Guali para la gestión de los recursos hídricos”; de la Universidad Santo Tomas - Colombia; donde consideró como objetivo general evaluar la aplicabilidad de los modelos lluvia – escorrentía GR4J Y GR2M en la cuenca del río Guali, como alternativa para la gestión de los recursos hídricos, “calibrando ambos modelos en base a la información de la precipitación y evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite, para el uso de los modelos se empleó un lenguaje de programación PYTHON y las hojas de Excel programadas por CEMAGREF, según los resultados obtenidos se pudo evidenciar que el modelo GR2M, obtuvo una eficiencia en la etapa de



calibración según el criterio de Nash del 67% y del 79.1% en la etapa de validación que indica que el modelo GR2M fue ajustable en la cuenca del río Guali, para el modelo GR4J se obtuvo una eficiencia en la etapa de calibración del 76.2% y en la etapa de validación del 80%, lo que indica que este modelo es aplicable y ajustable en la cuenca del río Guali).

Saito et al. (2008), en el artículo: “A watershed modeling approach to streamflow reconstruction from tree-ring records” aplicaron el modelo abcd para calcular caudales a escalas de tiempo anuales, utilizando la menor cantidad de entradas posible, el modelo fue calibrado en el río Walker, que se extiende a ambos lados del límite entre la Sierra Nevada de California y la Gran Cuenca de Nevada. Aunque el modelo incorporó relaciones simplificadas entre precipitación y otros componentes del ciclo hidrológico, predijo caudales anuales de agua con correlaciones de 0.87 cuando se utilizaron valores de precipitación apropiados.

2.1.2 Antecedentes a nivel nacional

Mamani Caceres (2015), en la investigación: “Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico - estocástico Lutz Scholz”; en la Universidad Nacional del Altiplano; con el objetivo general de generar caudales medios mensuales a partir de la precipitación total mensual para la cuenca del río Coata, mediante el modelo matemático. Escorrentía Lutz Scholz con fines de planeamiento hídrico; para ello se realizó el “análisis de consistencia de la información pluviométrica e hidrométrica, llegándose a demostrar que son consistentes y homogéneos, la precipitación media mensual de la cuenca del río Coata fue obtenido mediante el método de promedio aritmético, aplicando el modelo de Lutz Scholz, se destaca que los resultados de la prueba estadística de consistencia de la media de los caudales generados son



iguales a la media de los caudales aforados del río Coata, ya que el valor de T calculado (0.61) es menor que el valor de T tabular (1.64); y la desviación estándar de los caudales generados son estadísticamente iguales a la desviación estándar de los caudales aforados, debido a que el valor de F calculado (1.16) es menor que F tabular (1.17). Finalmente se llegó a la conclusión: que con la investigación realizada se puede comprobar que es factible determinar los caudales medios mensuales mediante la precipitación media mensual aplicando modelos determinísticos estocásticos”.

Metzger J. (2017), realizo el estudio: “Modelamiento hidrológico para pronóstico estacional de caudales del río Ramis”, donde estableció como objetivo general calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M con fines de pronóstico estacional de caudal en la cuenca del río Ramis; donde concluye, que se utilizaron 10 estaciones con información de precipitación con un periodo entre los años 1994 a 2015, cuyos datos son consistentes de acuerdo al análisis de doble masa realizado. Asimismo, el modelo hidrológico GR2M simuló de forma eficiente los caudales observados de la época de avenida y estiaje, obteniéndose un Nash de 82% para la etapa de calibración y 80.7% para la etapa de validación. También se realizó la simulación de caudales utilizando la base de datos PISCOv2.0 como datos de entrada al modelo, con la cual se ha obtenido un buen desempeño en la etapa de calibración con un Nash de 83.56%, pero disminuyo la eficiencia en la etapa de validación con un Nash de 64.51%.

Cruz Adrianzén y Romero Callo (2018), en la investigación: “Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: GR2M, Témez y Lutz Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas”, en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas; donde estableció como objetivo principal determinar cuál de estos tres



modelos: GR2M, Témez y Lutz Scholz tiene mejor comportamiento del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Callazas; donde se obtuvieron las siguientes conclusiones: en el proceso de calibración el modelo GR2M alcanzo un coeficiente de eficiencia de Nash de 0.851; además en la etapa de validación se obtuvo un valor de 0.723, resultando que este modelo tiene un ajuste “Muy Bueno”; para el modelo Lutz Scholz se obtuvo un coeficiente de eficiencia de Nash de 0.776 y 0.563 para la calibración y validación respectivamente, resultando que este modelo tiene un ajuste “Muy Bueno”; los coeficientes de eficiencia de Nash del modelo Témez en la etapa de calibración y validación alcanzaron valores de 0.565 y 0.470 respectivamente, resultando que este modelo tiene un ajuste “Bueno”. Finalmente, de los resultados obtenidos de la aplicación de los tres modelos, se destaca que el modelo GR2M es el que simula mejor el proceso de transformación de lluvia en escorrentía.

Quintana Yupanqui (2018), en la investigación: “Aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas”; en la Universidad Peruana Los Andes; planteo como objetivo general de evaluar el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas; llegando a la siguiente conclusión: Los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias obtenidos para el modelo hidrológico Lutz Scholz fueron de 0.60 y -0.56, el cual representa que se tiene un ajuste “bueno”; mientras que para el modelo hidrológico Thomas, se obtuvieron los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias de 0.62 y 0.46, representando así un ajuste “muy bueno”; por lo tanto, el modelo hidrológico que mejor se ajusta para la estimación de caudales medios mensuales en la subcuenca del río Shullcas es el modelo hidrológico Thomas.



Espinoza Vilca (2018), en la investigación: “Evaluación y comparación de seis modelos de simulación de caudales y su validación en las bocatomas Apacheta, Choccoro y Chicllarazo de la irrigación Cachi”; en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; donde consideró como objetivo general analizar la evaluación y comparación de seis modelos de simulación de caudales y su validación en las bocatomas Choccoro, Chicllarazo y Apacheta de la irrigación Cachi; se aclara que se utilizaron 04 modelos hidrológicos para la generación de caudales medios mensuales y 02 modelos para la simulación de avenidas, llegando a la siguiente conclusión: se realizó la calibración y validación de la simulación de los caudales medios mensuales en las cuencas de estudio, los promedios de indicadores estadísticos fueron catalogados como bueno para el modelo Témez y Lutz Scholz, excelente para el modelo abcd y el modelo GR2M.

Carmona Arteaga (2019), en la investigación: “Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada PISCO para las cuencas del río Biabo”; en la Universidad Nacional Agraria la Molina; con el objetivo de calibrar los caudales generados en la estación Requena Biabo y validar los datos de precipitación del estudio PISCO v2.1 para la cuenca; llegando a la siguiente conclusión: para la calibración de los caudales generados mediante el método GR2M, se observó que los parámetros de intercambio del modelo varían muy poco para diferentes periodos de tiempo, encontrándose que el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, estaría en el rango de bueno y muy bueno.

Mamani Mamani (2020), en la investigación: “Aplicación de un modelo hidrológico Agregado Lluvia - Escorrentía a paso de tiempo mensual en la cuenca del río Callacame, Perú”; en la Universidad Nacional del Altiplano; consideró el objetivo general de evaluar un modelo hidrológico agregado lluvia - escorrentía a



paso de tiempo mensual para la generación de caudales medios mensuales en la cuenca del río Callacame, Perú; para ello, se realizó la consistencia de la información hidrometeorológica, los valores de precipitación y temperatura promedio areal se calcularon por los métodos de interpolación Kriging, polígonos de Thiessen e inverso de la distancia ponderado, la evapotranspiración potencial fue calculada mediante los métodos de Hargreaves-Samani, Hargreaves-Samani Global y Ravazzani, obteniendo los siguientes resultados: al utilizar estimaciones de precipitación observada y la ETP mediante el método modificado por Ravazzani son muy buenos en la etapa de calibración ($NSE = 75.4\%$) y la etapa de validación ($NSE = 76.6\%$), mientras que el rendimiento fue bueno utilizando la ETP mediante el método modificado de Droogers y Allen, y Hargreaves y Samani, concluyendo así que el modelo GR2M, representa adecuadamente la dinámica estacional de caudales observados, pudiendo ser utilizado como base en la planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Callacame.

Condori Flores (2020), en la investigación: “Generación de caudales medios mensuales para la subcuenca del río Cañipia a partir de las características hidrológicas de la cuenca Alta”; en la Universidad Nacional del Altiplano; consideró el objetivo general de generar caudales medios mensuales para la subcuenca del río Cañipia a partir de las características hidrológicas de la cuenca alta del río Apurímac; llegando a la siguiente conclusión: el modelo GR2M presenta una alta eficiencia, para el periodo de calibración (84.6%) así como en el periodo de validación (84.3%), por lo que el modelo GR2M se ajusta satisfactoriamente a la cuenca de estudio, por otro lado la comparación del análisis de eficiencia de los modelos GR2M y Lutz Sholz indican que ambos modelos



tienen un buen desempeño en la generación de caudales medios mensuales, por presentar una correlación de caudales generados de $R^2=0.7845$.

2.1.3 Antecedentes a nivel local

INRENA (2003), la Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, río Desaguadero, Lago Poopo y Salar de Coipasa – ALT y el Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú – INRENA, realiza el proyecto “Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Ramis”, en donde la determinación de la disponibilidad hídrica se basó primeramente en la calibración del modelo precipitación-escorrentía Lutz Scholz para las estaciones hidrométricas de Puente Ayaviri, Azángaro y Ramis, concluyendo que el modelo adoptado reproduce mucho mejor los caudales mínimos, por lo que es aceptable.

INRENA & Ramis (2008), el Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú – INRENA, mediante la Administración Técnica del Distrito de Riego Ramis, realiza el estudio hidrológico denominado: “Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del río Ramis”, en donde modeliza las cuencas de los ríos Ayaviri y Azángaro, empleando el modelo matemático de tipo determinístico-estocástico Lutz Scholz, con la finalidad de calibrar el modelo y poder generar series sintéticas en puntos de interés y contar con información hidrológica en puntos específicos de la cuenca, y que en la realidad en dichos puntos no existe información observada de caudales.

Tito C. (2010), en la investigación: “calibración del modelo Lutz Scholz en la sub cuenca del río Ayaviri”; en la Universidad Nacional del Altiplano, donde utilizo el modelo hidrológico de Lutz Scholz, para la calibración de caudales en la sub cuenca del río Ayaviri, llegando a la conclusión de que “los caudales



generados muestran buena concordancia con los caudales observados, por tanto, el modelo es válido para su uso en la generación de caudales medios mensuales del río Ayaviri. recomienda implementar las sub cuencas con programas de medición de caudales”.

De los antecedentes mencionados a nivel local, podemos destacar que solo se aplica el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la determinación del caudal medio mensual del río Ayaviri, mas no se determina la eficiencia que presenta dicho modelo hidrológico mediante medidas estadísticas de bondad de ajuste.

2.2 LA HIDROLOGÍA

Según Chow et al. (1994), las ciencias hídricas “están relacionadas con las aguas de la Tierra: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos. Puede considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas. En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida del agua entre la Tierra y la atmósfera” (p. 1).

Villón B. (2002), señala que “la hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos” (p. 15).

Por último, Mejía M. (2006), define la hidrología como “la ciencia que estudia las aguas que pueden ser aprovechables en forma superficial, así como en forma subterránea, siempre que sea una profundidad económicamente aprovechable” (p. 3).



2.3 CICLO HIDROLÓGICO

Según Linsley et al. (1977), “el ciclo hidrológico es un punto útil, aunque académico, desde el cual comienza el estudio de la hidrología, comienza con la evaporación de agua en los océanos, el vapor de agua resultante es transportado por las masas móviles de aire” (p. 1).

Bajo condiciones adecuadas el vapor de condensa para formar las nubes, las cuales, a su vez, pueden transformarse en precipitación, la precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de diversas maneras, la mayor parte de esta es retenida temporalmente por el suelo, en las cercanías del lugar donde cae, y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, otra porción de agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo o a través de este hasta alcanzar los canales de las corrientes, la porción restante penetra más profundamente en el suelo para hacer parte del suministro de agua subterránea, bajo la influencia del gravedad, tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea se mueven cada vez hacia zonas más bajas y con el tiempo pueden incorporarse a los océanos, sin embargo, una parte importante de la escorrentía superficial y del agua subterránea regresa a la atmósfera por medio de evaporación y transpiración, antes de alcanzar los océanos (Linsley et al., 1977, p. 1).

Según Aparicio Mijares (1992), el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, y su descripción se puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo efectos de la radiación solar y el viento. “El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la



tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar” (p. 17).

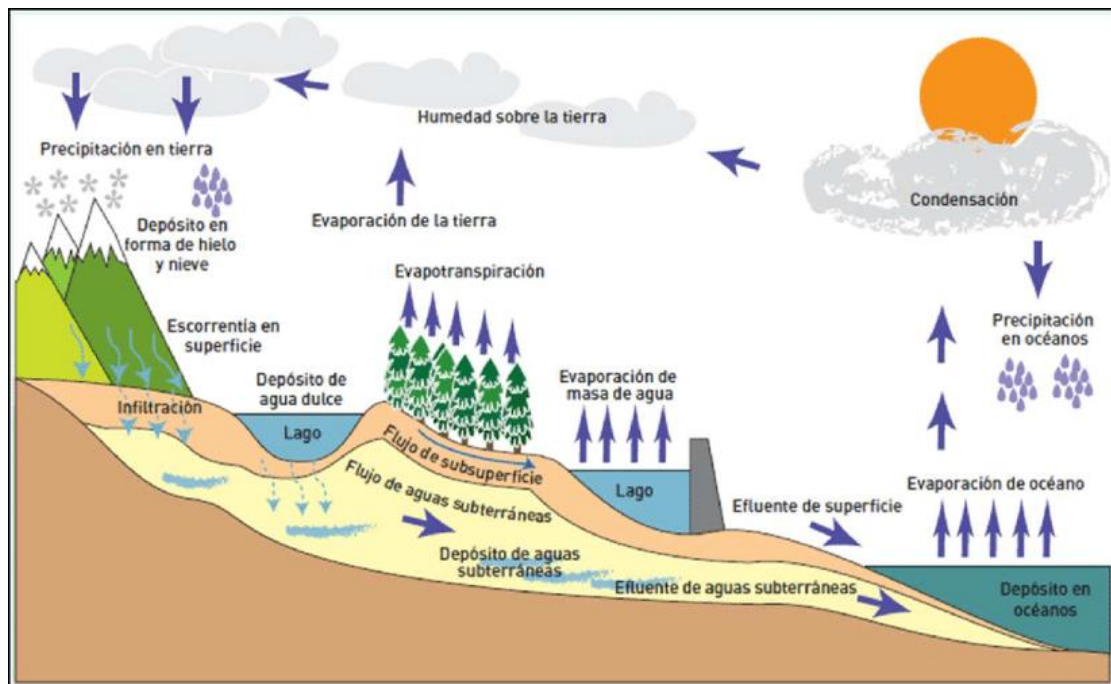
El ciclo hidrológico se considera como un sistema, cuyos componentes que lo integran son: “precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico, estos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total, y pueden analizarse independientemente o combinarse los resultados de acuerdo con las interacciones entre los subsistemas; por lo tanto el sistema hidrológico se resume como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas” (Chow et al., 1994, p. 5).

Según Villón B. (2002), “el ciclo hidrológico es un conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.)” (p. 16).

Por su parte, Mejía M. (2006), el ciclo hidrológico puede ser definido como “la interminable circulación que siguen las partículas del agua en cualquiera de sus estados. La circulación se efectúa en forma natural y durante la misma, el agua sufre transformaciones físicas, que en nada alteran su cantidad” (p. 6).

Figura 1

Ciclo hidrológico del agua

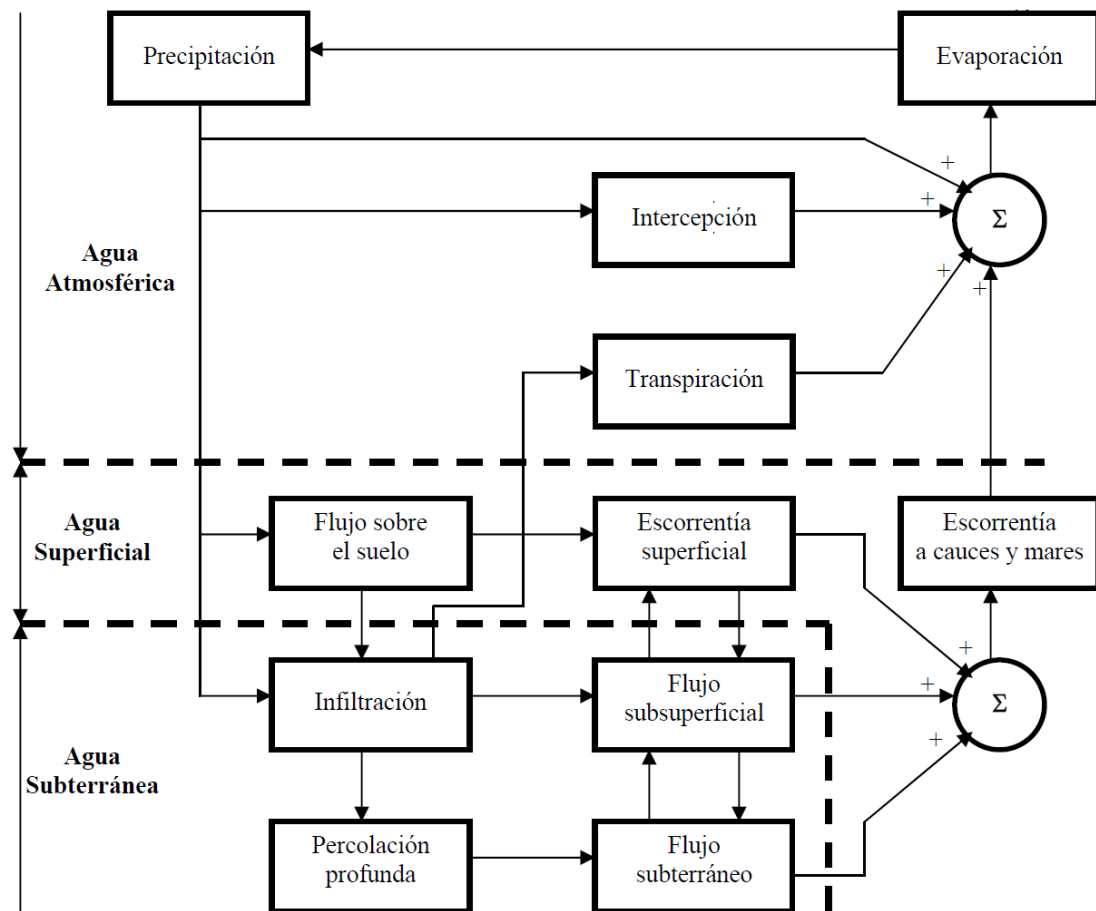


Nota. Adaptado de Andino (2019).

En la figura 2, se representa al “ciclo hidrológico global como un sistema. Las líneas punteadas dividen el sistema total en tres subsistemas: el **sistema de agua atmosférica**, que contiene los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el **sistema de agua superficial** que contiene los procesos de escorrentía superficial, flujo sobre el suelo, flujo subsuperficial y subterráneo (hacia los cauces y a los océanos); y el **sistema de agua subsuperficial**, que contiene los procesos de infiltración, percolación profunda, flujo subsuperficial y flujo subterráneo” (Mejía M., 2006, p. 9).

Figura 2

Representación del sistema hidrológico global mediante un diagrama de bloques



Nota. Adaptado de Mejía M. (2006).

2.4 COMPONENTES DEL PROCESO HIDROLÓGICO

2.4.1 Precipitación

Según Chow et al. (1994), la precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua a la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de la masa de aire son:



a.- La elevación frontal, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal.

b.- La elevación orográfica, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa.

c.- La elevación convectiva, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostiene por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa (p. 65).

2.4.2 Intercepción

Según Santayana Vela (2007), menciona que es la precipitación retenida en la cobertura vegetal, no tiene mayor importancia en las avenidas grandes; sin embargo, debido a algunos tipos de vegetación puede representar una porción considerable de la lluvia anual. La capacidad de almacenamiento por intercepción es generalmente satisfecha en las primeras horas de tormenta, de manera que un alto porcentaje de lluvia durante las tormentas de corta duración es interceptado. Después que la vegetación está saturada y el almacenamiento por intercepción se completa, la cantidad de agua que alcanza el suelo es igual a la lluvia menos la evaporación a partir de la vegetación.

2.4.3 Evaporación

La evaporación “se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. Este aumento de energía cinética provoca que



algunas moléculas de agua se eleven de manera continua a la atmósfera. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmósfera se condensan y regresan al cuerpo de agua” (Aparicio Mijares, 1992, p. 47).

Chow et al. (1994), define que “la evaporación desde la superficie terrestre comprende la evaporación directa desde la superficie del suelo y desde la superficie de vegetación, y la transpiración a través de las hojas de las plantas, mediante el cual el agua es extraída por las raíces de estas, transportada hacia arriba a lo largo de sus tallos y difundida a la atmosfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas. Los procesos de evaporación desde la superficie terrestre y de transpiración de la vegetación se conocen con el nombre de evapotranspiración” (p. 83).

2.4.4 Evapotranspiración

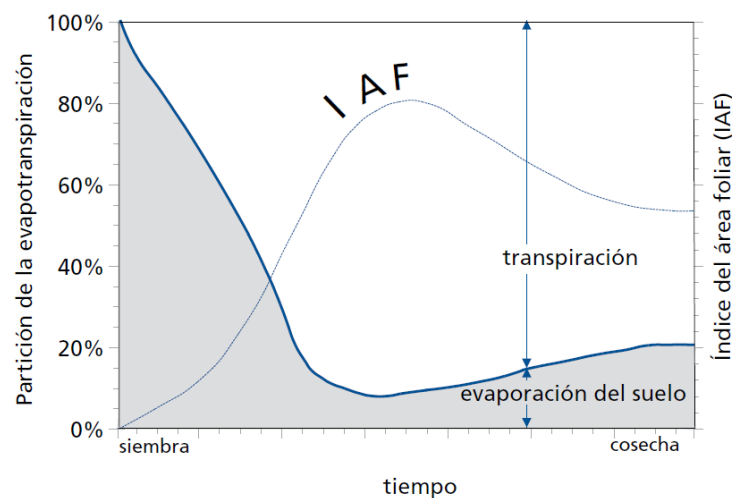
Según la FAO (2006), la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (p. 3).

En la figura 3 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por

unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (FAO, 2006, p. 3).

Figura 3

Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual



Nota. Adaptado de FAO (2006).

2.4.5 Infiltración

“Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares” (Aparicio Mijares, 1992, p. 177).

2.4.6 Almacenamiento

Casas (2002), señala que el agua subterránea es proveniente de la precipitación y se forma por infiltración o percolación de corrientes y lagos; la percolación directa es el proceso más efectivo de la recarga del agua subterránea donde la capa freática está más cerca de la superficie del terreno y puede fluir más



tarde en forma de manantiales o llegar a las corrientes como escurrimiento y a los cauces como gasto base o gasto de agua subterránea.

El almacenamiento en el subsuelo es la principal fuente de humedad del perfil del suelo. Una parte del agua aquí almacenada percola hacia el almacenaje de agua subterránea profunda y se pierde de la fase superficial del ciclo hidrológico. El almacenaje de depresiones, es definido como el agua que es retenida en pequeñas depresiones del terreno y que no se convierte en escurrimiento superficial, pero puede contribuir a ambos (infiltración y evaporación) dependiendo del tiempo que permanece en esas depresiones del terreno.

2.4.7 Escorrentía

Villón B. (2002), “el escurrimiento es otra componente del ciclo hidrológico y se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (estación de aforo). Si se analiza en un corte esquemático la superficie terrestre, se tiene que la precipitación cuando llega a la superficie, se comparte de la siguiente manera:

- Una parte de la precipitación se infiltra; satisface la humedad del suelo de las capas que se encuentran sobre el nivel freático del agua, una vez que estas capas se han saturado, el agua subterránea es recargada por la parte restante del agua que se infiltra.
- Otra parte de la precipitación, tiende a escurrir sobre la superficie terrestre; a la precipitación que ocasiona este escurrimiento, se llama altura de precipitación en exceso.



- Una pequeña proporción se pierde.

Con base en lo anterior, el escurrimiento se clasifica en tres tipos:

Escorrimento superficial, es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el escurrimiento total es inmediato, y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que esta termine; la parte de la precipitación total que da lugar a este escurrimiento se denomina precipitación en exceso.

Escorrimento subsuperficial, es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada. El efecto sobre el escurrimiento total puede ser inmediato o retardado; si es inmediato se le da el mismo tratamiento que el escurrimiento superficial, en caso contrario como escurrimiento subterráneo.

Escorrimento subterráneo, es aquel que proviene del agua subterránea la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado”.

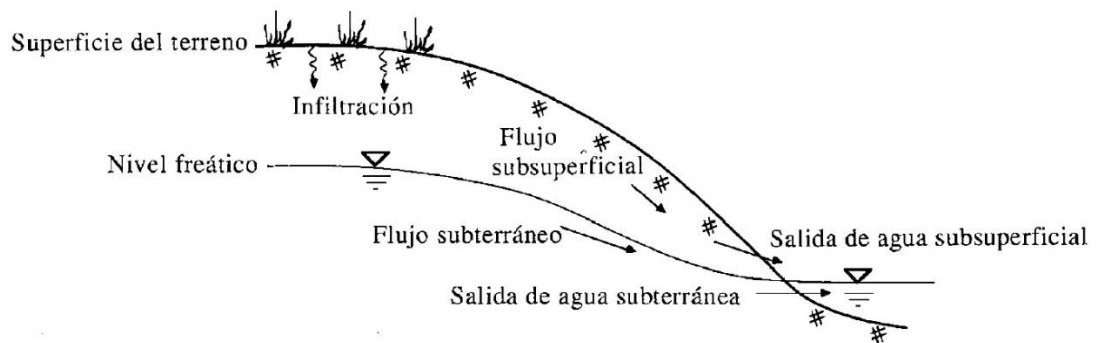
Con base en la forma en que contribuyen “al escurrimiento total, el escurrimiento se clasifica en: escurrimiento directo cuando su efecto es inmediato, y escurrimiento base si su efecto es retardado. El hecho de presentarse una precipitación, no implica necesariamente que haya escurrimiento superficial, y en algunos casos tampoco escurrimiento subterráneo, esto depende de una serie de factores” (p. 135).

Chow et al. (1994), en la figura 4 “se muestran en forma esquemática los procesos de flujo subsuperficial y las zonas en que ellos ocurren. Tres procesos importantes son la infiltración de agua superficial en el suelo para convertirse en humedad del suelo, el flujo subsuperficial o flujo no saturado a través del suelo, y

el flujo de agua subterránea o flujo saturado a través de los estratos de suelo o roca” (p. 101).

Figura 4

Zonas y procesos del agua subsuperficial

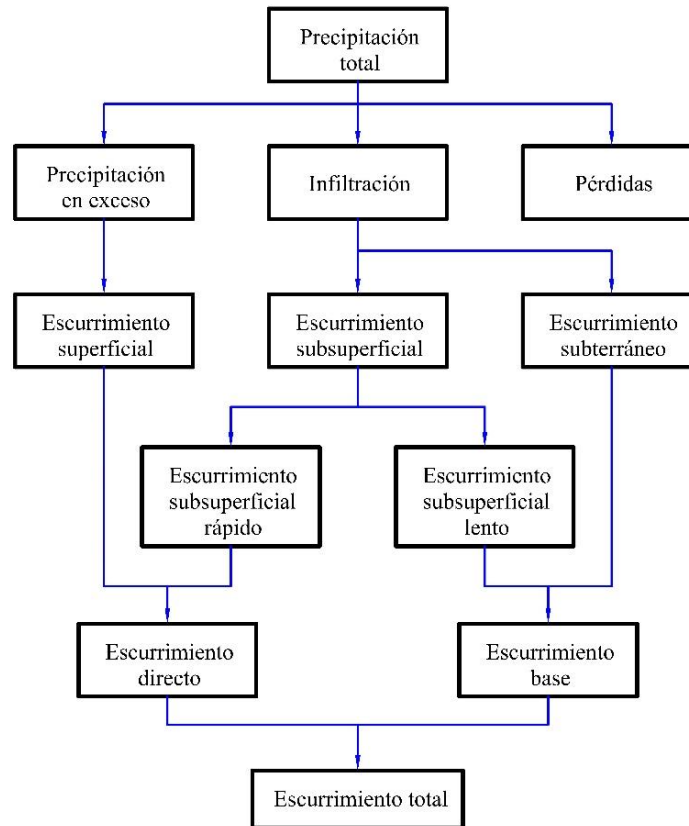


Nota. Adaptado de Chow et al. (1994).

En la figura 5, se presenta un esquema donde se explica la relación entre la precipitación y escurrimiento total.

Figura 5

Relación entre la precipitación y el escurrimiento total



Nota. Adaptado de Villón B. (2002).

2.4.8 Balance hídrico de una cuenca

Menciona Mejía M. (2006), que el balance hídrico en una cuenca hidrográfica no es tan simple, debido a que ocurren diversas pérdidas durante el proceso. Así como la evaporación que tiene lugar desde el momento en que se inicia la precipitación; el agua precipitada luego de llegar al suelo comienza a ser almacenada, pero la superficie del suelo no es plana ya que existe depresiones en el terreno de la cuenca, el agua allí acumulada eventualmente será evaporada o infiltrada en el suelo; no obstante, alcanza los cursos de agua o se transforman en escorrentía, el agua continúa sufriendo el proceso de evaporación y que debe ser considerada.



Otro proceso que ocurre, desde el momento en que la precipitación toca el suelo, es el de la infiltración ya que ningún suelo es impermeable y existen siempre pérdidas por infiltración; cuando el agua penetra en el suelo, sigue diversos caminos quedando almacenada temporalmente en el suelo, y luego percola hacia capas profundas, conformando el agua subterránea o moviéndose lateralmente, como flujo subterráneo, pudiendo aflorar nuevamente o fluir para otra cuenca (Mejía M., 2006, p. 12).

Mejía M., (2006), teniendo en cuenta todos estos procesos mencionados, el balance hídrico de una cuenca hidrográfica generalmente se puede representar mediante las siguientes ecuaciones matemáticas:

a) Balance hídrico en la superficie

$$P - R + Rg - Es - Ts - I = Ss$$

b) Balance hídrico debajo de la superficie

$$I + G1 - G2 - Rg - Eg - Tg = Sg$$

c) Balance hídrico en la cuenca hidrográfica (suma de las ecuaciones a+b)

$$P - R - (Es + Eg) - (Ts - Tg) - (G1 - G2) = (Ss + Sg)$$

En las ecuaciones anteriores, los subíndices “s” y “g” significan el origen del vector, sobre o debajo de la superficie del suelo, respectivamente.

Donde:

P = Precipitación

E = Evaporación

T = Transpiración

R = Escorrentía superficial



G = Flujo subterráneo

I = Infiltración

S = Almacenamiento

2.5 CUENCA HIDROGRÁFICA

Para Monsalve Sáenz (1999), una cuenca hidrográfica “es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple” (p. 33).

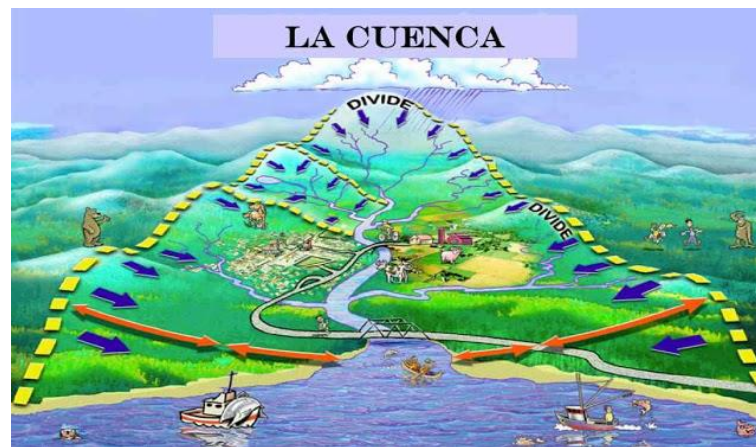
Villón B. (2002), menciona que la cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido (p. 21).

Según Aparicio Mijares (1992), “una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida”.

“La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable” (p. 19).

Figura 6

Cuenca hidrográfica



Nota. Adaptado de Ceballo (2012).

2.6 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA

Según Gámez Morales (2010), el ciclo hidrológico, visto al nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren, dentro de la cuenca, varios fenómenos que modifican dicha respuesta. Estos fenómenos en gran parte están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca (p. 35).

“Los parámetros morfológicos intentan reflejar las características de la cuenca en cuanto a su forma y la influencia en la respuesta a las precipitaciones. Se deduce a partir de la cartografía y se incluyen en los proyectos hidrológicos forestales” (Gámez Morales, 2010, p. 35).

La geomorfología de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, queda definida por tres tipos de parámetros las cuales son: parámetros de forma de la cuenca, parámetros de relieve de la cuenca y parámetros de la red hidrográfica de la



cuenca, que se especificaran detalladamente cada una de ellas en la metodología de la presente investigación.

2.7 CAUDAL

Es la descarga líquida en un río, representa el volumen de agua que pasa por una sección transversal o sección de control en un intervalo de tiempo. Generalmente sus unidades de medición se expresan en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (l/s). Se debe mencionar que generalmente el caudal medido en una sección de control o estación hidrométrica está relacionado a un nivel relativo y/o absoluto (Arboleda et al., 2018, p. 17).

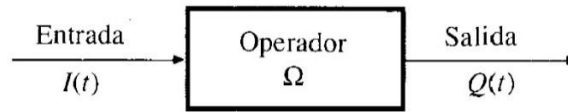
2.8 MODELO HIDROLÓGICO

Para Chow et al. (1994), “un modelo hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas” (p. 21).

Las entradas y las salidas pueden expresarse como función del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, en donde t pertenece al rango de tiempo T en consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por: $Q(t) = \Omega I(t)$, la cual se conoce como ecuación de transformación del sistema. El símbolo Ω es una función de transferencia entre la entrada y la salida (Chow et al., 1994, p. 8).

Figura 7

Representación esquemática de la operación de un sistema



Nota. Adaptado de Chow et al. (1994).

Según Mejía M. (2006), es una aproximación del sistema real, sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables, y su estructura, un conjunto de ecuaciones o funciones de transferencia que transforman las variables de entrada en variables de salida. Una de las primeras clasificaciones agrupa a los modelos hidrológicos en dos categorías: **Modelos físicos y modelos matemáticos**. Los primeros representan el sistema sobre una escala reducida, tal como los modelos hidráulicos; los segundos representan el sistema en forma matemática, mediante una serie de funciones que relacionan las variables de salida con variables de entrada. La mayoría de los procesos hidrológicos son aleatorios y su magnitud varía con el tiempo y con el espacio, por lo que el desarrollo de un modelo con esas características es una tarea muy difícil y requiere de una simplificación, despreciando algunas fuentes de variación (p. 10).

Por lo tanto, los modelos hidrológicos representan de manera simplificada los sistemas hidrológicos reales, con los cuales es posible estudiar la relación causa-efecto de una unidad hidrográfica utilizando la información de entrada y salida, con ellas se logra un mejor alcance de los procesos físicos hidrológicos que suceden en una unidad hidrográfica.

La definición anterior puede utilizarse a una unidad hidrográfica, puesto que la entrada inicial de agua es por medio de la precipitación y otras formas, y una porción de



ella sale de la unidad hidrográfica, mediante el cauce principal en forma de escorrentía superficial.

2.8.1 Clasificación de los modelos hidrológicos

Chow et al. (1994), menciona que “los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos” (p. 9).

2.8.1.1 Modelos físicos

“Estos incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa; y modelos análogos, que usan otros sistemas físicos con propiedades similares a las del prototipo” (Chow et al., 1994, p. 9) .

2.8.1.2 Modelos abstractos

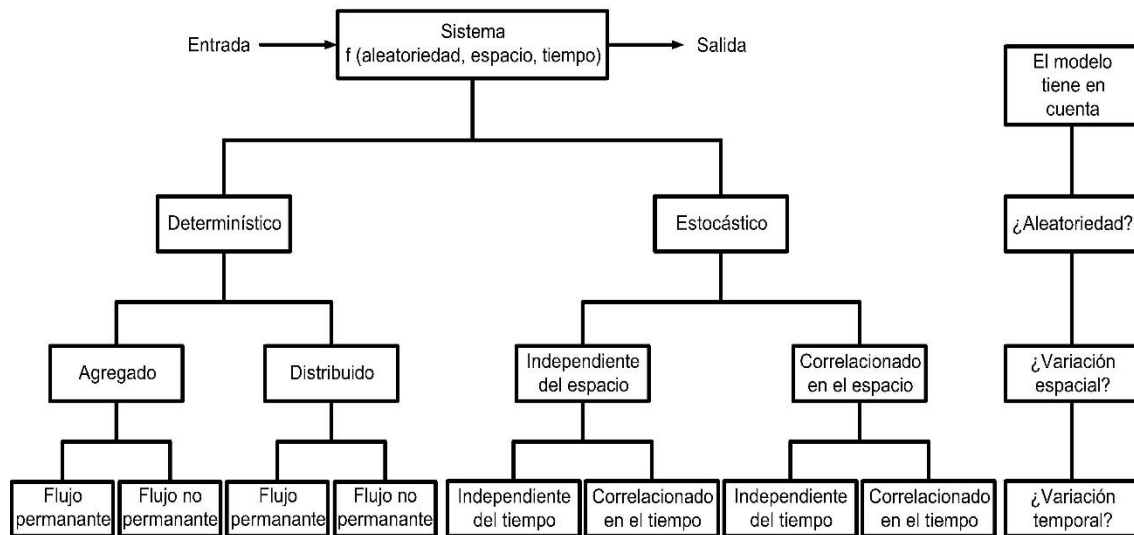
Los modelos abstractos representan el sistema en forma matemática. La operación del sistema se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo, y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, pero que están descritas a través de distribuciones de probabilidad (Chow et al., 1994, p. 9).

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse teniendo en cuenta las formas en que se lleva a cabo esta simplificación. Existen tres decisiones que deben tomarse en un modelo: ¿serán o no aleatorias las variables del modelo?, ¿variarán en el espacio o será uniforme?, ¿variarán en el tiempo o serán

constantes? El modelo puede localizarse en un “árbol” de acuerdo con estas alternativas, tal como se muestra en la figura 8 (Chow et al., 1994, p. 10).

Figura 8

Clasificación de modelos hidrológicos



Nota. Adaptado de Chow et al. (1994).

Todos los modelos hidrológicos son aproximadamente de la realidad, luego la salida de un sistema real nunca puede pronosticar con certeza; así mismo, los fenómenos hidrológicos varían con las tres dimensiones del espacio y con el tiempo, pero la consideración simultánea de las cinco fuentes de variación (aleatoriedad; tres dimensiones espaciales, tiempo) se ha llevado a cabo solo para algunos pocos casos idealizados. Un modelo práctico usualmente considera una o dos fuentes de variación (Chow et al., 1994, p. 12).

2.8.1.3 Según la naturaleza del algoritmo planteado

a) Modelos empíricos

Los modelos empíricos o también llamados de caja negra, son la representación de un sistema real con explicaciones matemáticas utilizando datos



experimentales sin realmente tratar de explicarlo mediante leyes físicas generales. Se basan en relaciones de entrada-salida y no se preocupan por describir los procesos y comportamientos internos del sistema. Este tipo de modelo es desarrollado mediante investigación y experimentación, contiene parámetros que pueden tener poco sentido físico. El método racional, el número de curva del Soil Conservation Service, GR4J y modelos estocásticos de series de tiempo son ejemplos de esta clase (Tellez Rojas, 2016, p. 8).

b) Modelos de base física

“En los modelos de base física o también llamados de caja blanca o teóricos, se conocen todos los procesos y comportamientos internos del sistema. Las leyes que rigen el sistema son totalmente conocidas, utilizan las ecuaciones físicas básicas tales como conservación de la masa, momento y energía para describir estos procesos hidrológicos. Pueden permitir diferentes predicciones de un sistema bajo cualquier condición, se asume que la recolección de datos requeridos es posible. Sin embargo, estos modelos son difíciles de desarrollar ya que sólo pueden ser utilizados en sistemas físicos limitados o para investigaciones específicas, ejemplos de estos modelos son SHE y TOPMODEL” (Tellez Rojas, 2016, p. 8).

c) Modelos conceptuales

“Los modelos conceptuales o también llamados de caja gris, se encuentran en un intermedio entre los empíricos y los de base física. Generalmente consideran leyes físicas, pero con una gran simplificación, utilizan técnicas matemáticas y utilizan almacenamientos o tanques para representar los balances de agua.



Ejemplos de estos modelos son el HBV, SAC-SMA y SOCONT” (Tellez Rojas, 2016, p. 9).

2.8.1.4 Según las técnicas involucradas en la modelación

a) Modelos determinísticos

Según Chávarri Velarde (2017), menciona que:

Los modelos matemáticos de tipo determinístico son aquellos que tienden a establecer relaciones cuantitativas de causa-efecto, utilizando una relación directa para obtener una respuesta debida a un requerimiento, sea por medio de una ecuación empírica o por medio de un operador desarrollado a partir de criterios e hipótesis experimentales.

En un modelo determinístico no se considera la probabilidad de ocurrencia de valores y de variables implicadas en el proceso, pero si se considera que tal proceso esté representado (implícita o explícitamente) por una hipótesis, según la cual, el conocimiento de las leyes de la evolución de los fenómenos físicos y de su estado actual, permiten prevenir rigurosamente sus estados futuros en la física clásica.

Un modelo determinístico se utiliza en el caso que se disponga de poca información, caso frecuente de las obras de ingeniería hidráulica, en los cuales uno tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria, de la cual se dispone generalmente de series temporales de datos.

Un modelo determinístico consiste en una serie de submodelos, los cuales cada uno representa un proceso hidrológico particular (infiltración, flujo superficial, etc.) y usualmente es estructurado de acuerdo a ello (p. 17).



b) Modelos estocásticos

Los modelos estocásticos tienen su fundamento en el máximo aprovechamiento de la información contenida en las muestras analizadas. Su utilización como modelos predictores input – output en la evaluación de aportaciones es prácticamente nula, pues dada su sencillez (son generalmente lineales) están muy limitados en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos. Presentan como ventaja frente a los determinísticos que su formulación estocástica facilita la obtención de las incertidumbres en las estimas de parámetros y variables (Estrela, 1992, p. 35).

Cuando una variable aleatoria puede ser observada de una manera secuencial, X_1, X_2, \dots, X_n donde el subíndice representa intervalos de tiempo, a tal secuencia se le denomina serie temporal estocástica. Un modelo matemático que representa un proceso estocástico se le denomina “modelo estocástico” o “modelo de series de tiempo”. Este modelo tiene una cierta forma o estructura matemática y un conjunto de parámetros (Estrela, 1992, p. 35).

Estrela (1992), señala que una expresión general sería la siguiente:

$$Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-n}, X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-m}, \Theta) + \epsilon_t$$

Donde:

Y_{t-i} : Vector formado por las variables de salida del sistema en el instante $t - i$, $i = 0, n$.

X_{t-j} : Vector formado por las variables de entrada al sistema en el instante $t - j$, $j = 0, n$.

Θ : Vector de parámetro del modelo.

εt : Vector de residuos o errores del modelo en el instante t .

En general los modelos estocásticos asumen que la serie de residuos, εt , es independiente en el tiempo y se distribuye normalmente. Estas hipótesis deben satisfacerse con los valores estimados de los parámetros Θ .

Las aplicaciones fundamentales de los modelos estocásticos en la evaluación y análisis de los recursos hídricos son las siguientes:

- Completado de series de precipitación y de aportaciones en la red fluvial.
- Generación de series sintéticas de aportaciones, cuya finalidad no es en sí misma la evaluación del recurso, ya que esta se tiene con la serie histórica, sino su análisis probabilístico (p. 35).

2.8.1.5 Según su representación espacial

a) Modelos agregados

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos subsuperficiales y subterráneos. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos agregados” o “agrupados” (Cabrera, 2012b, p. 6).

b) Modelos distribuidos

Con el fin de tener una mayor representatividad de la cuenca, los modelos distribuidos la discretizan en un gran número de elementos pequeños regulares e



irregulares, grillas o mallas donde el flujo de agua va pasando de un punto o nodo hacia el siguiente y así el agua drena por toda la cuenca, teniendo variabilidad espacial de parámetros, variables y resultados, permitiendo así interacción entre los diferentes procesos en cada una de las celdas generadas. Este tipo de modelos representa de muy buena manera la heterogeneidad de la cuenca capaz de obtener resultados en cada celda; sin embargo, requiere de una gran cantidad de datos que puede que no existan o se encuentren incompletos, mayor cantidad de parámetros para calibrar, mucho tiempo para ajustarlos y recursos computacionales considerables (Tellez Rojas, 2016, p. 10).

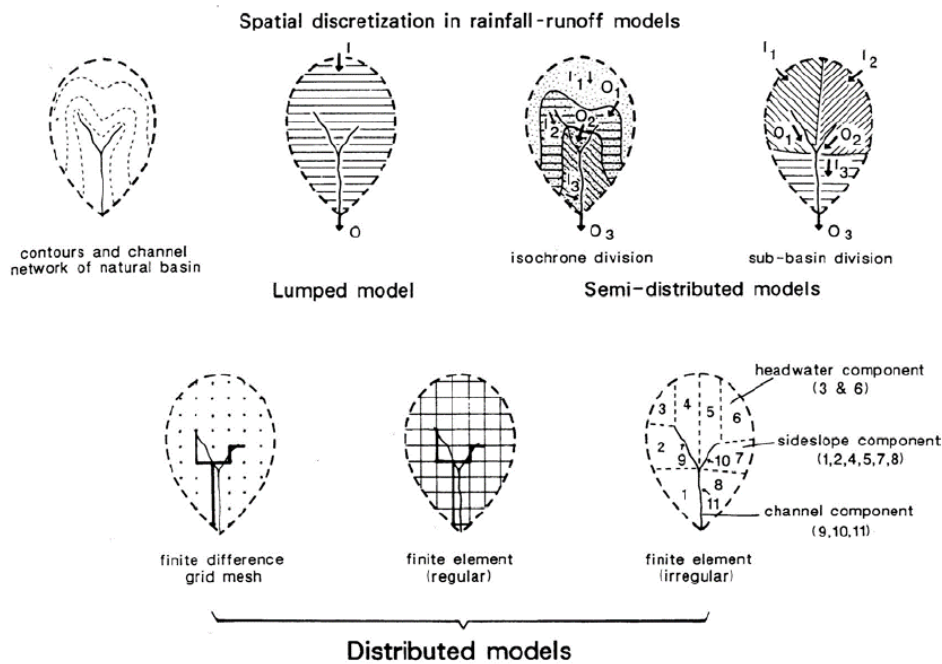
c) Modelos semidistribuidos

Cuando las cuencas ya no son pequeñas, muchas características de ella no se pueden asumir como homogéneas en toda su superficie con lo que se pueden discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico y analizar cada una de forma independiente para posteriormente combinar sus efectos. Para evitar las dificultades de los modelos distribuidos, se desarrollaron los modelos semidistribuidos los cuales son un término medio entre los agregados y los distribuidos, en la que la cuenca es dividida en diferentes subcuencas o unidades de mayor tamaño que las grillas de los modelos distribuidos, que a su vez son tratadas como una sola unidad al juntarse. Su estructura tiene una mejor base física que los modelos agregados y requiere menor cantidad de datos de entrada que los distribuidos (Tellez Rojas, 2016, p. 10).

En la figura 9 se pueden apreciar los 3 tipos de modelos según su representación espacial:

Figura 9

Modelos hidrológicos según su distribución espacial



Nota. Adaptado de Xu (2002).

2.8.1.6 Según la escala temporal

a) Basado en eventos

“Los modelos basados en eventos simulan el sistema para un sólo evento específico en un pequeño intervalo de tiempo que puede ser desde una hora o menos hasta muchos días” (Jajarmizadeh et al., 2012).

b) Proceso continuo

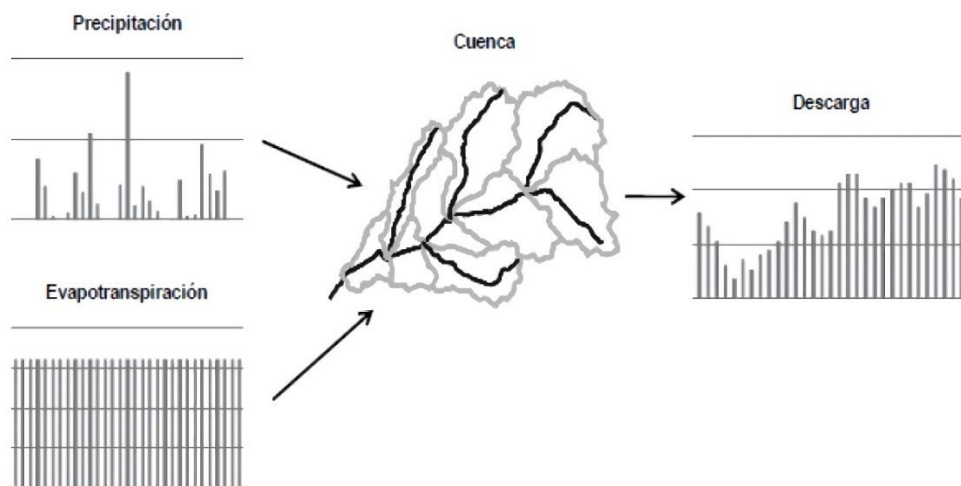
Los modelos de proceso continuo realizan simulaciones para uno o varios eventos en grandes intervalos de tiempo que pueden ser bastantes años. Una de las grandes ventajas de este tipo de modelos es que pueden tener más éxito para cuencas no aforadas y para el estudio de las características a largo plazo de un sistema (Tellez Rojas, 2016, p. 11).

2.8.2 Proceso de modelación hidrológica

El proceso de modelación trata acerca de la ejecución de operaciones que se realizan al interior de un sistema, para luego producir resultados como salidas del mismo. El sistema al cual nos referimos está representada por una unidad hidrográfica, donde se introducen los datos de precipitación, evapotranspiración y otras variables, para luego por medio de las operaciones definidas dentro del modelo considerado, se obtienen los caudales en los puntos de interés (Silva, 1987).

Figura 10

Proceso de modelación hidrológica



Nota. Adaptado de Silva (1987).

2.8.2.1 Calentamiento

El período de calentamiento es la etapa en la cual se realiza la simulación en un pequeño intervalo de tiempo previo a la calibración, en donde se busca inicializar el modelo para neutralizar el efecto y/o reducir la influencia de las condiciones iniciales que son desconocidas, para así al final del calentamiento



obtener unos valores que serán utilizados como condiciones iniciales para la calibración, pueden ser tales como humedad inicial, altura de nieve, altura de lámina de agua, etc. (Tellez Rojas, 2016, p. 12).

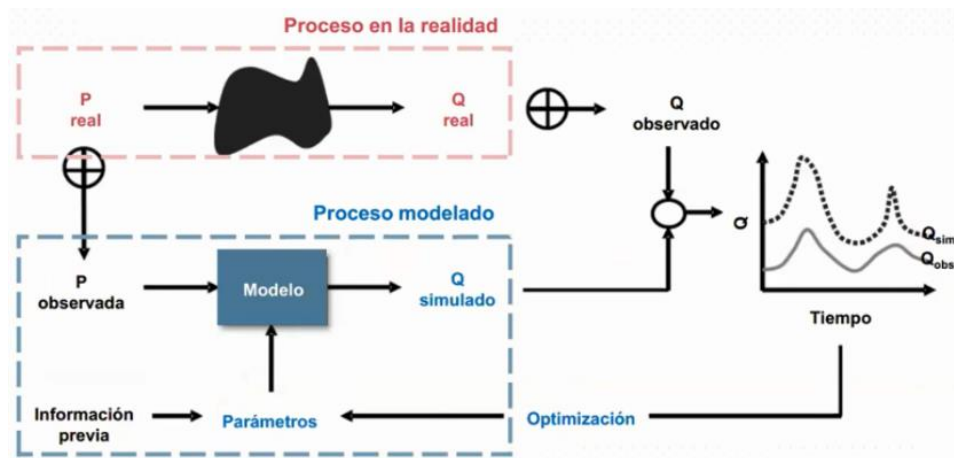
2.8.2.2 Calibración

En esta etapa se intenta lograr la mejor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de respuesta actual de la cuenca, al identificar los parámetros efectivos con los cuales la diferencia entre estas predicciones y observaciones sea menor posible (Tellez Rojas, 2016, p. 12).

Para poder hallar estos parámetros se puede realizar de dos maneras, la primera mediante calibración manual o también llamada prueba y error, en donde se realiza un ajuste manual a criterio propio, suele ser un proceso lento y en algunos casos no muy efectivo; la segunda es mediante la calibración automática en la que se optimiza utilizando técnicas numéricas de optimización, es un método más eficaz y conciso, aunque el tiempo que se tarda en arrojar los resultados depende del modelo, de la cantidad de parámetros y la escala temporal. Para evaluar las diferencias entre los resultados de la simulación se hace uso de índices de eficiencia y función objetivo los cuales son explicados más adelante (Tellez Rojas, 2016, p. 12).

Figura 11

Resumen esquemático del problema de calibración del modelo



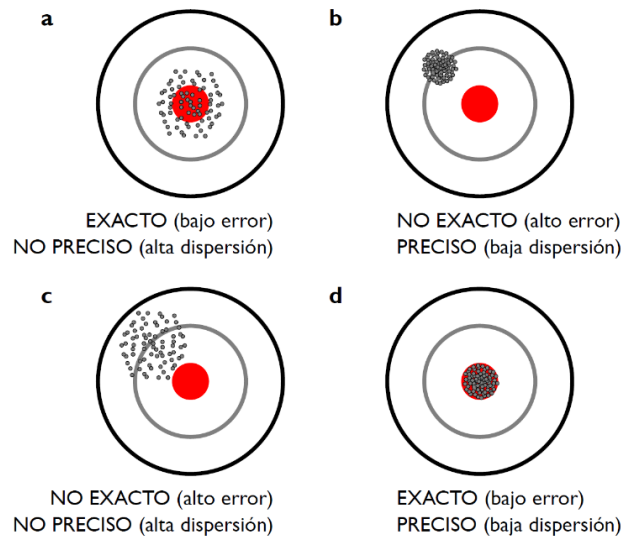
Nota. Adaptado de Vrugt et al. (2008).

2.8.2.2.1 Exactitud y precisión

Dos conceptos importantes a tener en cuenta antes de utilizar modelos hidrológicos son “exactitud” y “precisión”. La exactitud mide la performance de un modelo; es decir, la cercanía entre los valores simulados y los observados. Un modelo exacto no arroja los mismos resultados, pero estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor de la medida observada. La figura 12 (a) ilustra este concepto (Cabrera, 2017, p. 1).

Figura 12

Comparación entre los conceptos de exactitud y precisión de los datos



Nota. Adaptado de Ochoa-Tocachi et al. (2022).

También menciona Cabrera (2017), “la precisión mide la repetibilidad del experimento; es decir, la similitud entre valores simulados. Un modelo preciso arroja similares resultados, pero estos no son necesariamente cercanos a la medida observada” (p. 2). La figura 12 (b) ilustra este concepto.

Estos dos conceptos están relacionados con otros dos: errores aleatorios y errores sistemáticos. Los errores aleatorios son errores propios de fluctuaciones aleatorias de la magnitud medida o del proceso de medición y no son controlables. Debido a que son aleatorios, la medición realizada se encontrará alrededor de la medida real, muy característico de las medidas exactas. Por otro lado, los errores sistemáticos son errores que se repiten permanentemente y aproximadamente en la misma magnitud; esta característica hace que todas las mediciones se encuentren “desviadas” en un mismo valor de la medida real (como las medidas precisas). De esta manera, si se determina el valor sistemático, es fácil corregir la medida y obtener medidas mucho más exactas (Cabrera, 2017, p. 2).

La función de error, denominada también función de criterio o función objetivo, es una medida de las diferencias existentes entre los caudales observados y simulados. Los parámetros estadísticos más importantes a cuantificar y que se usaron para la presente investigación son: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), coeficiente de calibración (r), criterio de Schultz (D), raíz del error cuadrático medio (RMSE), porcentaje de sesgo (PBIAS) y Razon RMSE - desviación estándar de las observaciones (RSR).

2.8.2.3 Validación

Una vez que el modelo esté calibrado éste debe ser verificado para identificar su precisión, se realiza la simulación utilizando un período diferente al del paso anterior para evaluar que tan correctos son los parámetros arrojados en el proceso de calibración y comprobar si el modelo es estable. Si el modelo se encuentra bien calibrado, éste debe arrojar buenos resultados en cuanto a índices de eficiencia y función objetivo, ya que estos representan la bondad del ajuste del modelo en cuanto a los datos simulados y los observados. Existen tres tipos de validación siendo en el tiempo, en el espacio y en el espacio-tiempo, en donde las dos últimas son exclusivas de los modelos distribuidos (Tellez Rojas, 2016, p. 12).

2.9 REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS PROPUESTOS

Para la determinación de los caudales medios mensuales en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se ha tenido en cuenta la información disponible que nos permita la aplicación de los modelos hidrológicos: Lutz Scholz, GR2M y abcd.



2.9.1 Modelo determinístico y estocástico de Lutz Scholz

Este modelo hidrológico es combinado por que cuenta con una estructura determinística para el cálculo de los caudales mensuales para un año promedio (Balance Hídrico - Modelo determinístico), y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso markoviano - Modelo Estocástico); fue desarrollado por el experto Lutz Scholz para cuencas de la sierra peruana entre 1979 y 1980 en el marco de la Cooperación Técnica de la República de Alemania a través del Plan Meris II (Lutz Scholz, 1980).

Según Tarazona Santos, (2005), determinado el hecho de la ausencia de registros de caudal en la sierra peruana, el modelo se desarrolló tomando en consideración parámetros físicos y meteorológicos de las cuencas que puedan ser obtenidos a través de mediciones cartográficas y de campo; los parámetros más importantes del modelo son los coeficientes para la determinación de la precipitación efectiva, déficit de escurrimiento, retención y agotamiento de las cuencas; el procedimiento que siguió el experto Lutz Scholz fue:

- El primer paso es analizar los datos hidrometeorológicos de la cuenca en estudio y proceder a calcular los parámetros necesarios para la descripción de los fenómenos de la esorrentía promedio.
- En un segundo paso, establecer un conjunto de modelos estocásticos parciales de los parámetros para el cálculo de caudales en cuencas que carecen de información hidrométrica. Aplicando los datos meteorológicos regionalizados para la cuenca respectiva y los modelos parciales, se puede calcular los caudales mensuales.



- El tercer paso permite la generación de caudales para un periodo extendido en el punto de interés proyectada por un cálculo combinando (la precipitación efectiva con las descargas del mes anterior por un proceso markoviano) y, calibrando el modelo integral por aforos ejecutados (p. 22).

Este modelo fue implementado con fines de pronosticar caudales a escala mensual, teniendo una utilización inicial en estudios de proyectos de riego y posteriormente extendiéndose el uso del mismo a estudios hidrológicos con prácticamente cualquier finalidad (abastecimiento de agua, hidroelectricidad, etc.), los resultados de la aplicación del modelo a las cuencas de la sierra peruana, han producido una correspondencia satisfactoria respecto a los valores medidos (Tarazona Santos, 2005).

Precipitación efectiva

Según Vásquez, (2000), dice que, durante el proceso de almacenamiento hídrico del reservorio “suelo”, la precipitación pluvial constituye un alto porcentaje (en algunos casos el total) del contenido de agua en el suelo; pero parte de la lluvia de que dispone la planta para su desarrollo es únicamente una fracción de ésta; la otra parte se pierde por escorrentía, percolación profunda o evaporación.

Modelo de generación de caudales

Para Tarazona Santos (2005), el modelo hidrológico de Lutz Scholz calcula los caudales mensuales del año promedio de una cuenca de manera satisfactoria. La metodología para la generación de caudales toma como base el año promedio y es una combinación de un proceso markoviano de primer orden,

con una variable de impulso que viene a ser la precipitación efectiva. La expresión matemática para la generación de caudales mensuales es:

$$Q_t = b_1 + b_2 Q_{t-1} + b_3 PE_t + S.Z_t \sqrt{1 - R^2}$$

Donde:

Q_t = Caudal del mes t.

Q_{t-1} = Caudal del mes anterior (t-1).

PE_t = Precipitación efectiva del mes t.

S = Error estándar del estimado.

Z_t = Variable aleatoria normal independiente (0, 1) del mes t.

R^2 = Coeficiente de determinación múltiple.

b_1, b_2, b_3 = Coeficientes de regresión lineal múltiple.

b_1 = Factor constante (caudal básico).

Calibración de los coeficientes

El paso más importante consiste en calibrar los valores de los coeficientes b_1, b_2, b_3, S y R , los mismos que se obtienen a partir de una regresión múltiple donde la variable dependiente es el caudal medio escurrido en el mes presente Q_t y las variables independientes son: el caudal medio escurrido en el mes anterior Q_{t-1} y la precipitación media efectiva del mes presente PE_t . Los valores para la variable aleatoria se pueden tomar de una tabla o generarlos con el auxilio de la computadora, la única condición que deben cumplir es que se ajusten a una distribución normal, con una media igual a cero y desviación estándar igual a uno $N(0, 1)$ (Cruz Adrianzén & Romero Callo, 2018).

2.9.2 Modelo hidrológico GR2M

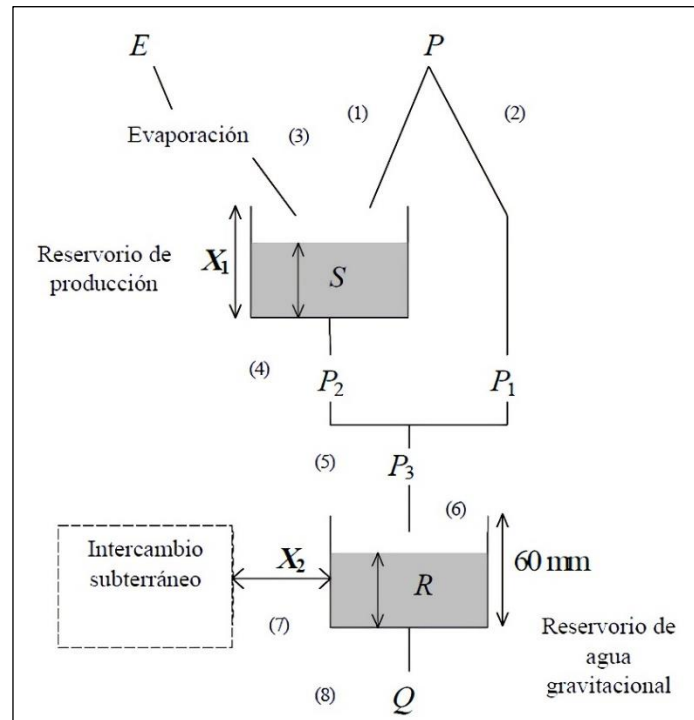
El modelo hidrológico GR2M es conceptual fue desarrollado por CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia). Su uso en el Perú fue introducido por el IRD (Instituto de Investigación y Desarrollo) de Francia, primero en estudios de modelización hidrológica en cuencas de la vertiente del Pacífico (SOFI CONSULT S.A.) y luego en cuencas de la región hidrográfica del Atlántico (Lacado W.) y del Titicaca (Vera H.), es así que se ha extendido en estudios de simulación hidrológica bajo escenarios de cambio climático, sobre todo los elaborados por SENAMHI (PACC-PRAA) (Metzger J., 2017, p. 12).

“GR2M es un modelo hidrológico agregado que simula caudales en intervalos mensuales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia” (Metzger J., 2017, p. 12).

Su estructura consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional. La figura 13 muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escorrentía y que son tomados en cuenta por el modelo (Metzger J., 2017, p. 12).

Figura 13

Arquitectura del modelo GR2M



Nota. Adaptado de Mouelhi et al. (2006).

De acuerdo a este esquema, P es la precipitación media de la cuenca, P_1 es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración actual, P_2 la percolación profunda, S el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es X_1 y la del reservorio gravitacional es asumida como 60 mm (Metzger J., 2017, p. 12).

El modelo GR2M sólo tiene dos parámetros a calibrar:

X_1 : Capacidad del reservorio suelo en milímetros (mm)

X_2 : Coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional)

X_2 oscila entre 1 y 2. Si $X_2=1$ significa que toda la precipitación neta del mes es transferida a la salida de la cuenca sin ser retenida en el reservorio de transferencia. En el caso extremo si $X_2=2$ toda la precipitación es retenida en el reservorio de transferencia (Metzger J., 2017, p. 12).

“El modelo ha sido implementado en diferentes programas como Fortran y hoja de cálculo, utiliza métodos de optimización para la calibración de los parámetros maximizando la eficiencia del modelo con el criterio de Nash-Sutcliffe (E)” (Metzger J., 2017, p. 13).

2.9.2.1 Descripción matemática del modelo GR2M

2.9.2.1.1 Función de producción

De acuerdo a la figura 13, parte de la precipitación es absorbida por el reservorio suelo y otra (P_1) se dirige al reservorio de agua gravitacional. El nuevo volumen de agua en el reservorio suelo (S_1) se calcula de la siguiente manera:

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

Donde: X_1 es la capacidad del reservorio suelo; y φ se define como:

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

Asumiendo que no hay pérdidas, el volumen de agua antes de la infiltración debe ser el mismo después de ésta; entonces:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2)$$

En una segunda instancia, el reservorio suelo será afectado por la evapotranspiración, reduciendo su volumen a S_2 . El nuevo volumen se calcula de la siguiente manera:

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1+\psi\left(1-\frac{S_1}{X_1}\right)} \quad (3)$$

donde: ψ es igual a:

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

Parte de este nuevo volumen S_2 será transferido al reservorio de agua gravitacional y el remanente se convertirá en el volumen inicial S para el siguiente período de análisis. El nuevo valor de S será:

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

Luego, el volumen de agua que percola P_2 se estimará como la diferencia entre S_2 y S :

$$P_2 = S_2 - S$$

2.9.2.1.2 Función de transferencia

Conocido el volumen de agua que percola, la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional (P_3), será:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (5)$$

Debido a que el reservorio de agua gravitacional contaba con un volumen inicial R , su nuevo volumen será:

$$R_1 = R + P_3 \quad (6)$$

Sin embargo, debido a que existe un intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, el volumen del reservorio se corrige por el factor X_2 :

$$R_2 = X_2 R_1 \quad (7)$$

Finalmente, el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática, dándonos como resultado el caudal de salida:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (8)$$

donde: $R = R_2 - Q$

Tabla 1

Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR2M

Modelo GR2M	Descripción	Rango
Parámetros	X_1 (mm) Capacidad de almacenamiento del reservorio de producción.	1-2000
	X_2 (adim) Coeficiente de intercambios de aguas subterráneas	0.01-2
Condiciones Iniciales	S_0 (mm) Almacenamiento inicial del reservorio de producción.	0- X_1
	R_0 (mm) Almacenamiento inicial del reservorio de agua gravitacional.	0-60

Nota. Adaptado de Mouelhi et al. (2006); Pagano et al. (2009).

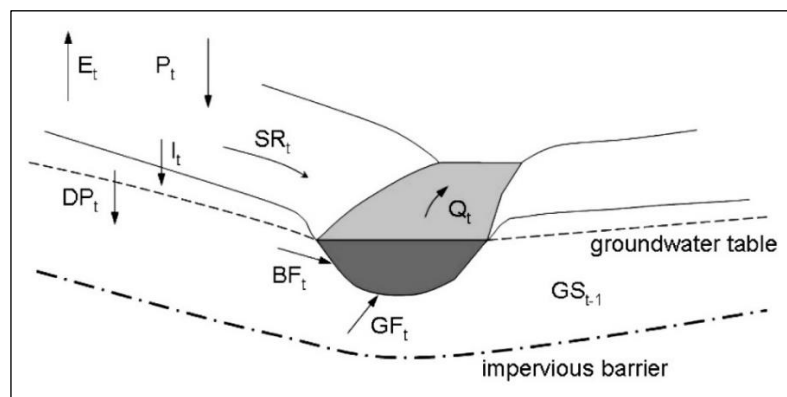
2.9.3 Modelo hidrológico abcd

El modelo “abcd” es un modelo de tipo precipitación escorrentía, el único dato de entrada es la precipitación y todas las demás variables son calculadas

como porcentajes de esta. La figura 14 muestra los componentes del modelo hidrológico abcd, P_t es la precipitación media de la cuenca, SR_t es la escorrentía superficial, E_t es la evapotranspiración actual, I_t la infiltración, DP_t la percolación profunda, GS_{t-1} el almacenamiento subterráneo, BF_t el flujo base, GF_t el flujo subterráneo, y Q_t el caudal a la salida de la cuenca (Fonseca, 2015, p. 3).

Figura 14

Representación simplificada de una cuenca hidrográfica utilizada en el modelo abcd



Nota. Adaptado de Saito et al. (2008).

2.9.3.1 Parámetros del modelo y condiciones

- a: Parámetro de escorrentía (fracción de precipitación que se convierte en escorrentía superficial en cada paso de tiempo).
- b: Parámetro de evapotranspiración (fracción de agua infiltrada que se evapora en cada paso de tiempo).
- c: Parámetro de flujo base (fracción de almacenamiento de agua subterránea que se convierte en flujo base en cada paso de tiempo).
- d: Parámetro de flujo de agua subterránea (fracción de almacenamiento de agua subterránea que se convierte en flujo de agua subterránea en cada paso de tiempo).

2.9.3.2 Condiciones

El planteamiento para la optimización del modelo hidrológico abcd, tiene la siguiente condición y/o restricción:

$$0 \leq a, b, c, d \leq 1$$

2.9.3.3 Descripción del modelo abcd

La precipitación se convierte en escorrentía superficial (SR_t) e infiltración (I_t), dependen del parámetro a , como se muestra:

$$SR_t = aP_t$$

$$I_t = (1 - a)P_t$$

Una parte de la infiltración se evapotranspira y la otra parte se percola, ambas dependen del parámetro b , como se muestra:

$$E_t = bI_t$$

$$DP_t = (1 - b)I_t$$

El almacenamiento subterráneo, es una condición inicial y es la fuente del flujo base a través del parámetro c y del flujo subterráneo a través del parámetro d , las ecuaciones de estos procesos son:

$$BF_t = cGS_{t-1}$$

$$GF_t = dGS_t$$

El almacenamiento subterráneo puede calcularse en cada intervalo de tiempo como:

$$GS_t = (GS_{t-1} - BF_t - GF_t) + DP_t$$

El caudal estimado es la suma de la escorrentía superficial y el flujo base:

$$Q_t = SR_t + BF_t$$

De acuerdo a estas definiciones, el modelo tiene cuatro parámetros de calibración, a (relacionado a SR e I), b (relacionado a E y DP), c (relacionado a BF), d (relacionado a GF), y una condición inicial el almacenamiento subterráneo inicial.

Para la optimización la efectuamos con la ayuda de solver de Excel, siendo las restricciones:

$$0 \leq a \leq 1$$

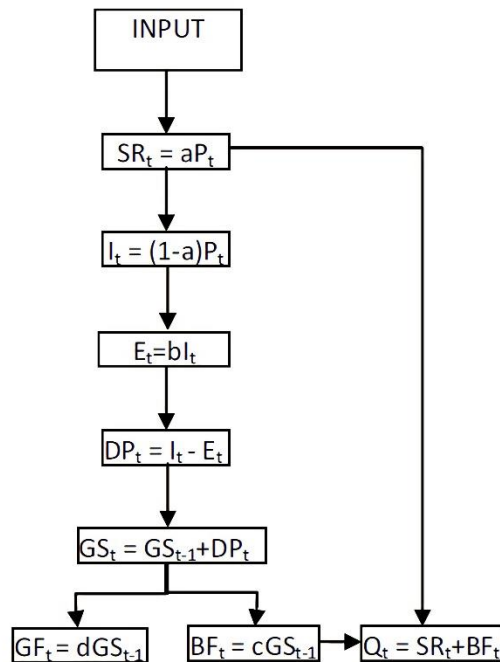
$$0 \leq b \leq 1$$

$$0 \leq c \leq 1$$

$$0 \leq d \leq 1$$

Figura 15

Estructura del modelo abcd



Nota. Adaptado de Cabrera (2012a).

2.10 MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTES

Según señala Cabrera (2017), la calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

2.10.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

El criterio de Nash-Sutcliffe (E) es uno de los indicadores estadísticos más utilizados en el área de la hidrología. Su valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

Q_{sim} : Caudales simulados

Q_i : Caudales observados

\bar{Q} : Promedio de los caudales observados

Este indicador, mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla: (Cabrera, 2017).

Tabla 2*Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe*

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Nota. Adaptado de Molnar (2011).

2.10.2 Coeficiente de calibración (r)

Según Cabrera (2017), “expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en nuestro caso, son los caudales observados y los caudales simulados”. Se formula como:

$$r = \frac{S_{obs, sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}}$$

Donde $S_{obs, sim}$, es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados:

$$S_{obs, sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{sim, i} - \bar{Q}_{sim})$$

y, S_{obs} y S_{sim} son las varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados respectivamente:

$$S_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2$$

$$S_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim, i} - \bar{Q}_{sim})^2$$

Donde:

\bar{Q} : Caudal medio observado

\bar{Q}_{sim} : Caudal medio simulado

n : Número de valores simulados

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre $0 < r < 1$: a mayor valor de r, mejor ajuste. El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas (Cabrera, 2017).

Tabla 3

Valores del coeficiente de correlación

Valor	Magnitud correlación
0.0 - 0.2	Mínima
0.2 - 0.4	Baja
0.4 - 0.6	Moderada
0.6 - 0.8	Buena
0.8 - 1.0	Muy buena

Nota. Adaptado de Mendoza (2015).

2.10.3 Criterio de Schultz (D)

Para Cabrera (2017), “el criterio de Schultz representa la desviación de los caudales simulados respecto de los observados”. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Donde Q_{\max} es la descarga máxima observada en el periodo en estudio. El uso de este criterio es recomendado para análisis de eventos de alta resolución temporal.

Tabla 4

Valores referenciales del criterio de Schultz

D	Ajuste
0 - 3	Muy bueno
3 - 10	Bueno
10 - 18	Suficiente
> 18	Insuficiente

Nota. Adaptado de Molnar (2011).

2.10.4 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Según Cabrera (2017), “la raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados”. Se formula como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}}$$

Donde:

Q_{sim} : Caudales simulados

Q_i : Caudales observados

n : Número de valores simulados

“El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste” (Cabrera, 2017).

2.10.5 Porcentaje de sesgo (PBIAS)

“El sesgo porcentual (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que sus contrapartes observadas” (Gupta et al., 1999, p. 139). Se calcula de la siguiente forma:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}}$$

El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación de modelo precisa. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo (Gupta et al., 1999, p. 139).

Tabla 5

Valores de PBIAS

PBIAS	Interpretación modelo
PBIAS < ± 10	Muy bueno
+ 10 ≤ PBIAS <± 15	Bueno
± 15 ≤ PBIAS < ± 25	Satisfactorio
PBIAS ≥ ± 25	No satisfactorio

Nota. Adaptado de Moriasi (2007).

2.10.6 Razón RMSE- desviación estándar de las observaciones (RSR)

Es una versión estandarizada del RMSE; se determina como la relación existente entre el RMSE y la desviación estándar de los datos observados, este valor se interpreta tomando en cuenta los criterios señalados por Moriasi (2007), la expresión que se utiliza para el cálculo de este indicador es:



$$RSR = \frac{RMSE}{DESVEST_{obser}}$$

Tabla 6

Valores de RSR

RSR	Interpretación modelo
$0.00 \leq RSR \leq 0.5$	Muy bueno
$0.50 < RSR \leq 0.6$	Bueno
$0.60 < RSR \leq 0.7$	Satisfactorio
$RSR > 0.7$	No satisfactorio

Nota. Adaptado de Moriasi (2007).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ZONA DE ESTUDIO

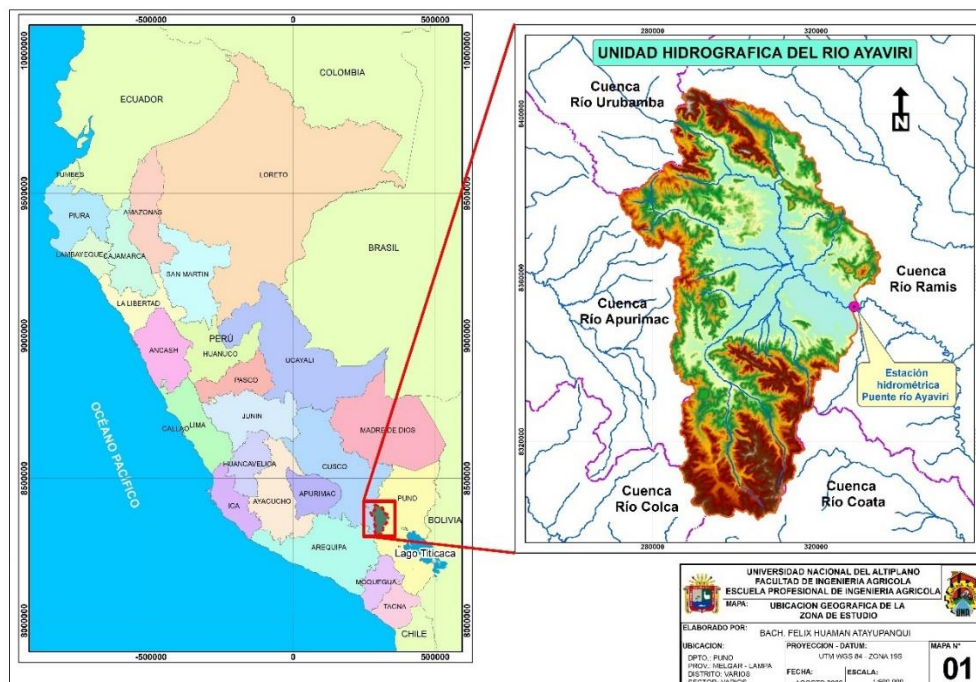
En este ítem se realiza una descripción general del lugar donde se realizó el proyecto de investigación, la cual corresponde a la unidad hidrográfica del río Ayaviri, que se encuentra ubicado de la siguiente manera:

3.1.1 Ubicación geográfica

La unidad hidrográfica del río Ayaviri, se encuentra ubicada según coordenadas geográficas y UTM Zona 19s - WGS84: Latitud Sur: 14° 24' y 15° 21', Longitud Oeste: 71° 7' y 70° 31', Este: 271771 – 337195, Norte: 8302391 – 8406986 y Altitud: 3,942 hasta 5,501 m.s.n.m.

Figura 16

Ubicación geográfica del área de estudio





3.1.2 Ubicación política

La unidad hidrográfica del río Ayaviri, políticamente se encuentra ubicada en: La región de Puno, provincia de Melgar y Lampa, distritos de Ayaviri, Umachiri, Santa Rosa, Macari, Cupi, Llalli, Ocuvi y Palca, y en varias localidades.

3.1.3 Ubicación hidrográfica

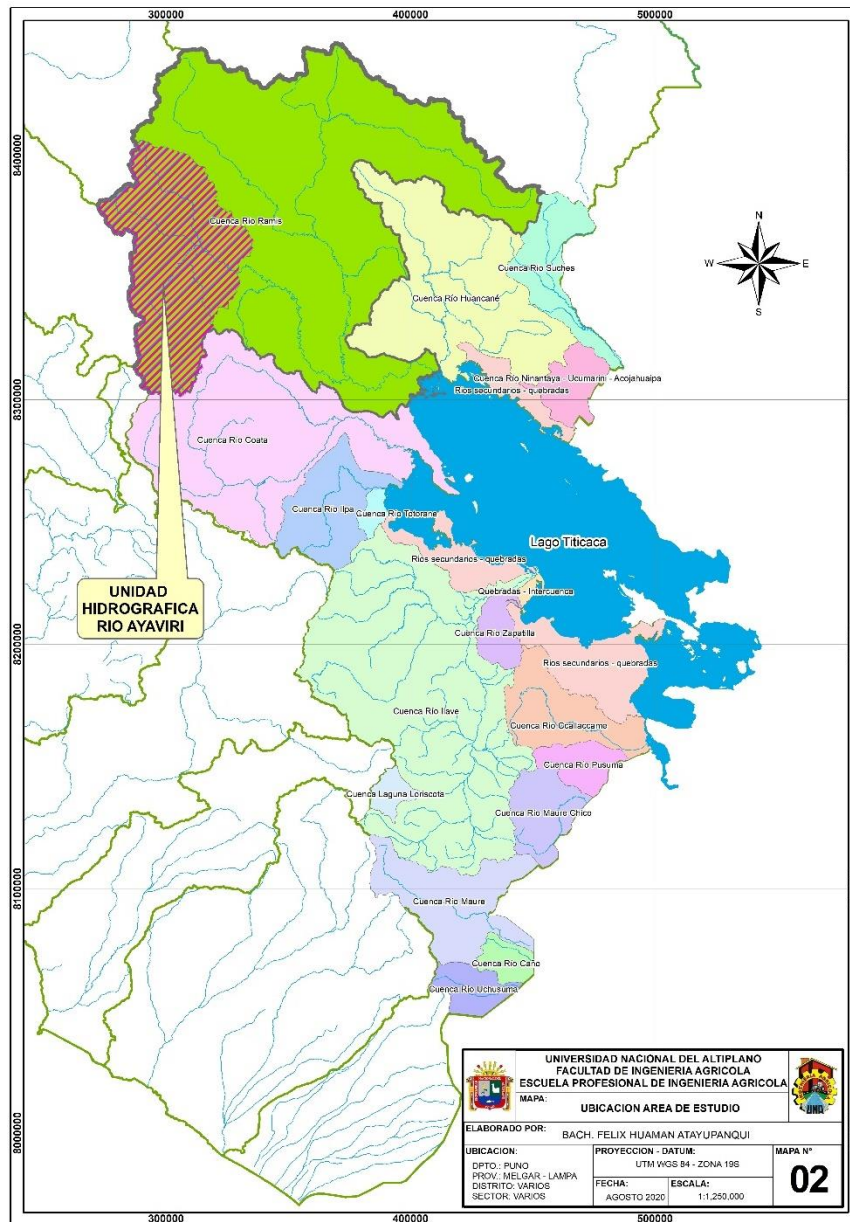
La unidad hidrográfica del río Ayaviri, hidrográficamente se encuentra ubicada en la cuenca del río Ramis, vertiente del Titicaca y el Sistema Hídrico: TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó, y Salar de Coipasa).

3.1.4 Límites hidrográficos

La unidad hidrográfica del río Ayaviri, limita con las siguientes cuencas: Este con la subcuenca Nuñoa y Ayaviri, Oeste con las cuencas de los ríos Urubamba, Apurímac y Colca, Norte con la cuenca del río Urubamba y subcuenca Nuñoa, y Sur con la cuenca del río Colca y Coata.

Figura 17

Ubicación hidrográfica del área de estudio



3.2 ACCESIBILIDAD

La ciudad de Ayaviri es el centro urbano más importante que se encuentra cercana a la unidad hidrográfica del río Ayaviri, usualmente las vías existentes son accesibles, ya que mediante una unidad móvil desde la ciudad de Ayaviri permite llegar hacia cualquier lugar o localidad del área de estudio.

La siguiente tabla muestra la distancia existente entre localidades.

Tabla 7

Acceso al área de estudio

Ruta		Distancia (km)	Tipo de vía
De	A		
Ayaviri	Chuquibambilla	18.0	Asfaltada
Chuquibambilla	Santa Rosa	24.0	Asfaltada
Chuquibambilla	Macari	19.5	Afirmado
Umachiri	Llalli	18.7	Asfaltada
Llalli	Cupi	6.0	Afirmado
Llalli	Ocuviri	26.5	Afirmado

3.3 MATERIALES

3.3.1 Equipos

Los equipos que se utilizaron en la presente investigación fueron: Laptop Lenovo Core i7, impresora a color Epson, GPS Garmin Legend H y cámara fotográfica digital.

3.3.2 Software

El software utilizado para el procesamiento de información y cálculos del trabajo de investigación son los siguientes: RStudio v. 1.2.5.019, Hydraccess v. 6.2, ArcGis v.10.5, Autocad Civil 3d 2020, Trend v. 1.0.2, Minitab 18 y Microsoft Office 2016.

3.4 DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

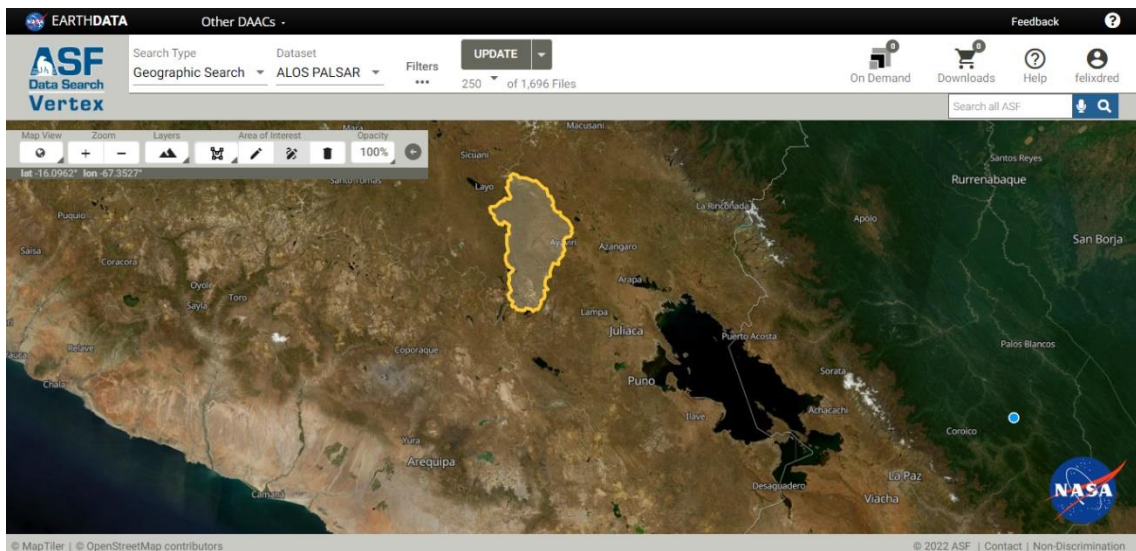
3.4.1 Información cartográfica

Esta información se obtuvo de la base de datos administrada por el ANA (Autoridad Nacional del Agua), Instituto Geográfico Nacional (IGN), de la misma forma se obtuvo la información DEM (Modelo Digital de Elevación), de las

imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR, estas imágenes raster poseen una resolución de 12.5 metros y el enlace de descarga es <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>.

Figura 18

Portal de descarga del DEM



3.4.2 Información pluviométrica

Para la presente investigación se empleó información de precipitación del conjunto de datos grillados mensuales PISCOpm v.2.1 (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) disponible desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016, con una resolución espacial de ~10 km., dicha base de datos espacial contiene la información de la precipitación a escala mensual, y se encuentra en un formato netCDF (network Common Data Form). El algoritmo de fusión se basa en métodos de interpolación geoestadística y determinista que incluyen tres fuentes de lluvia diferentes: (i) el conjunto de datos nacionales de pluviómetros monitoreados, (ii) climatología de precipitación fusionada con medidores radar y (iii) Precipitación Infrarroja del Grupo de Riesgos Climáticos (CHIRP).

El conjunto de datos está disponible públicamente en la Biblioteca de Datos del IRI (Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad), y el enlace de descarga es <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/> y está destinado a respaldar estudios hidrológicos y prácticas de gestión del agua.

Figura 19

Portal de descarga del producto PISCO en IRI

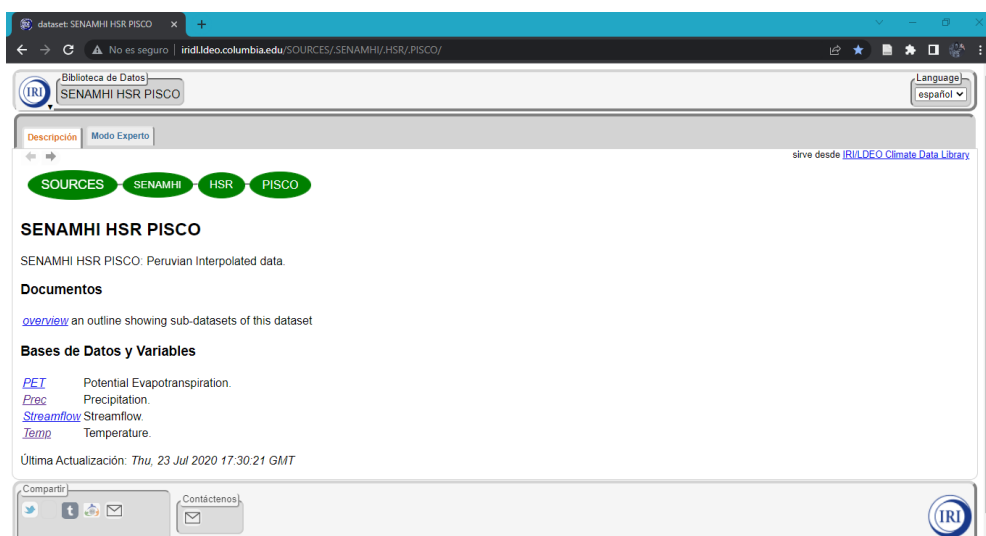
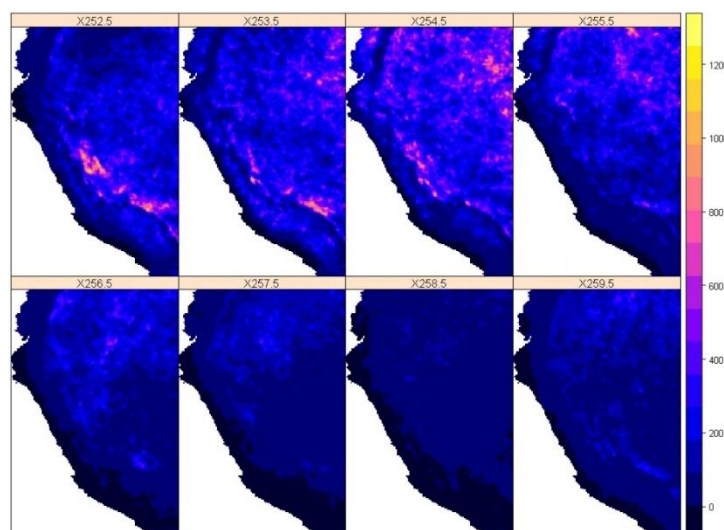


Figura 20

Precipitación mensual del producto PISCOpm v.2.1 a nivel nacional





Cabe indicar que la información de precipitación mensual de las estaciones pluviométricas existentes, que se usaron para verificar el grado de correlación entre los datos grillados de precipitación del producto PISCOpm v.2.1, fueron obtenidos del SENAMHI.

3.4.3 Información de temperatura

Respecto a la información meteorológica de temperatura mínima y máxima mensuales, para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se obtuvo del producto PISCOt v.1.1, al igual que la data de precipitación, el período de registro para la presente investigación corresponde a 1981-2016.

PISCOt v.1.1 es el resultado de la combinación entre datos observados de estaciones climatológicas convencionales, datos satelitales (LST) y variables topográficas (Z, X, Y y TDI). El método de construcción de PISCOt v1.1 es climatológicamente asistido, y conlleva tres principales pasos. En primer lugar, se hace una combinación a escala de normales climatológicas (nT); segundo, la interpretación de la anomalía mensual/diaria (dT) haciendo uso de la variación mensual de las normales ya mezcladas; y finalmente, la suma entre la normal grillada (G_nT) y la anomalía grillada (G_dT) para la obtención de Temperatura; proceso igual e independiente para temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tn) (Huerta et al., 2018, p. 5).

Los datos grillados de temperatura en PISCOt v.1.1 están distribuidos a una resolución de ~10 km. Para extraer los valores mensuales, se elaboró un código fuente para el programa RStudio, el que facilitó para extraer los valores mensuales de cada estación meteorológica considerada en la presente investigación.

Figura 21

Temperatura mínima mensual del producto PISCOt v.1.1 a nivel nacional

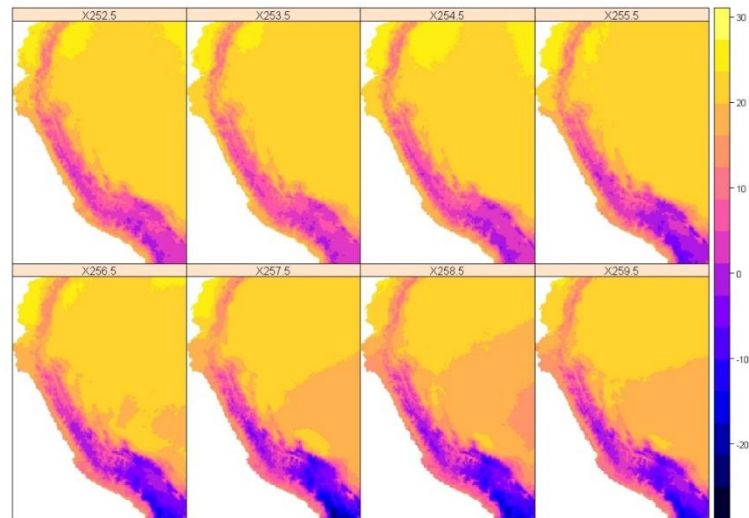
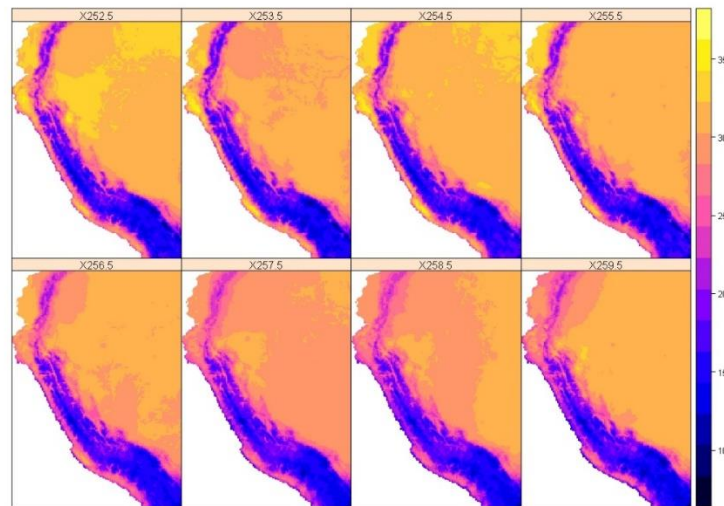


Figura 22

Temperatura máxima mensual del producto PISCOt v.1.1 a nivel nacional



3.4.4 Información hidrométrica

La información hidrométrica de caudal medio mensual observado de la estación hidrométrica puente Ayaviri se obtuvo del estudio realizado por la ANA (Autoridad Nacional del Agua), denominado: “Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica del río Ramis”, cuya longitud de los registros disponibles es de 36



años distribuidos entre el periodo 1981-2016, la que tiene validez y confiabilidad por ser una información de fuente confiable, y de gran utilidad para determinar la eficiencia que presenta cada modelo hidrológico, en el cálculo del caudal medio mensual del río Ayaviri.

Tabla 8

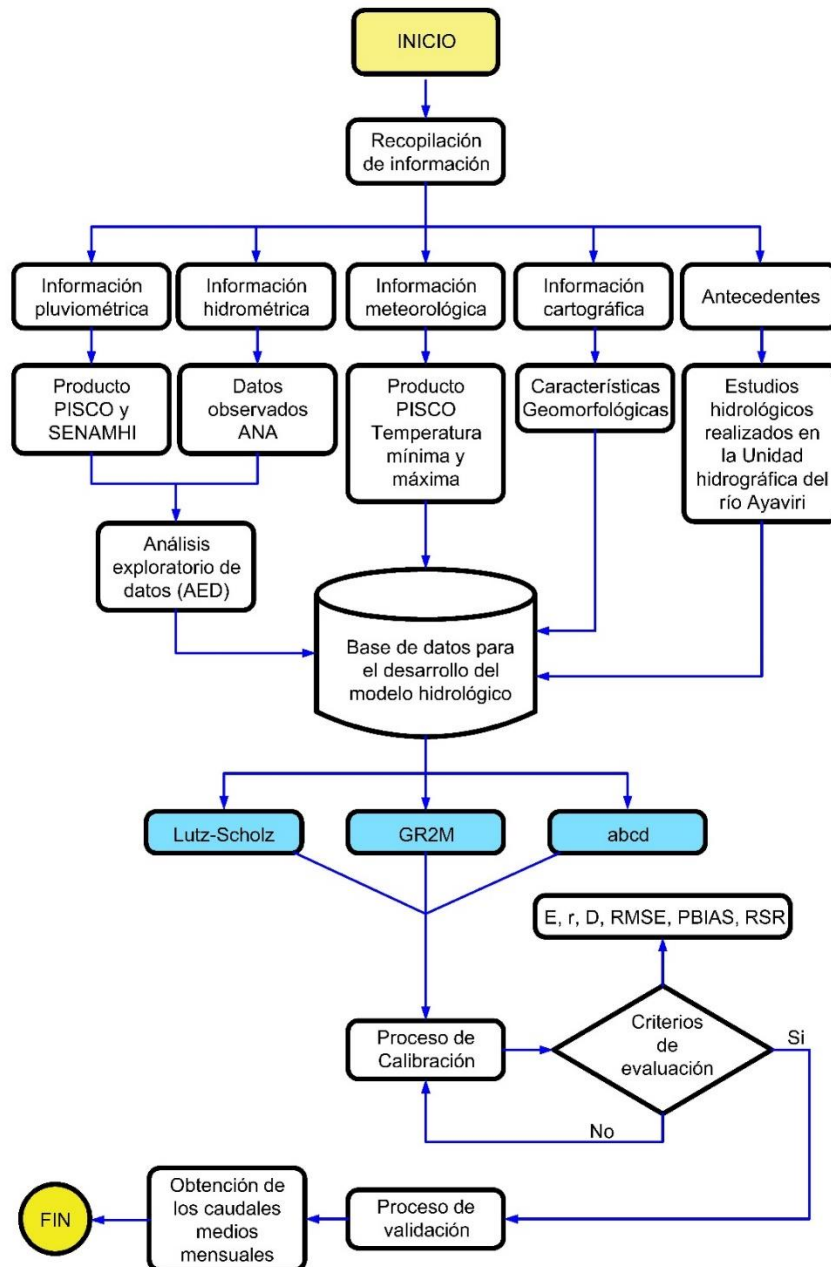
Fuentes de información

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Fecha	Enlace
DEM	12.5 m	ALOS PALSAR	2011	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/
Precipitación	Mensual 0.1° (~10km.)	PISCO - SENAMHI	1981-2016	http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/
Temperatura máxima y mínima	Mensual 0.1° (~10km.)	PISCO - SENAMHI	1981-2016	http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/
Datos hidrométricos	Mensual	ANA	1981-2016	https://www.gob.pe/ana

3.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 23

Esquema metodológico de la presente investigación



3.5.1 Recopilación de la información disponible

Para la presente investigación se recopiló toda la información existente útil para alcanzar los objetivos planteados, que es la determinación del caudal medio

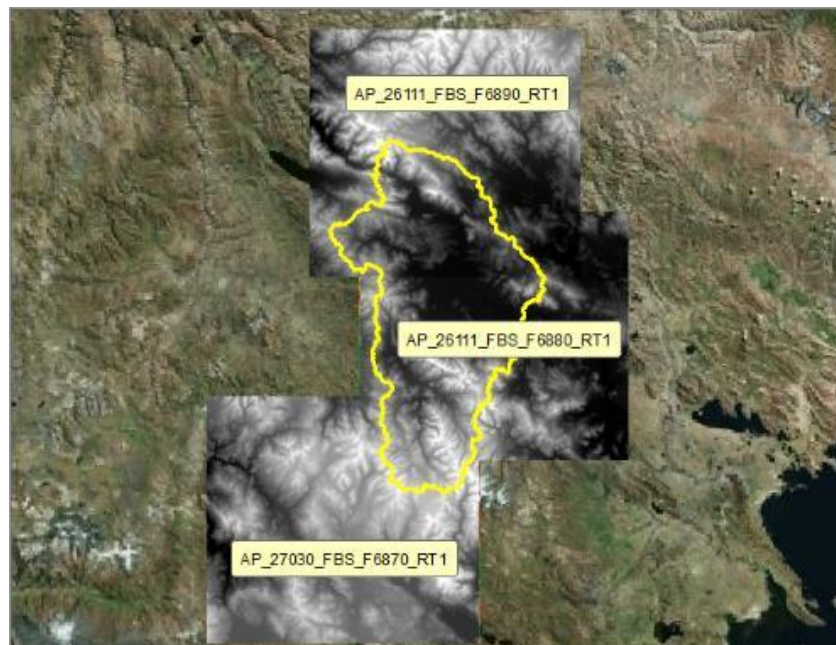
mensual aplicando los modelos hidrológicos de Lutz Scholz, GR2M y abcd en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

3.5.1.1 Información cartográfica

Se utilizaron cartas nacionales que cubren el área de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, por lo tanto, se usaron las siguientes hojas de la carta nacional: 29t, 29u, 30t, 30u, 31t y 31u, a escala 1: 100,000, elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), también se utilizaron los planos en formato shp elaborados por la autoridad nacional del agua (ANA), finalmente se obtuvo la información DEM (Modelo Digital de Elevación), de las imágenes de radar del satélite ALOS PALSAR.

Figura 24

Ubicación de las imágenes DEM descargadas



Teniendo la información cartográfica recopilada de distintas fuentes, se realizó la revisión de las bases de datos, con el propósito de igualar los formatos



y el sistema de coordenada que poseen cada archivo, para ello se empleó el software ArcGis.

En caso de la información Satelital ALOS PALSAR se ha elaborado un modelo de elevación digital del área de estudio, posteriormente esta información se utilizó para determinar los principales parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

3.5.1.2 Información pluviométrica

Se ha obtenido la información, del producto PISCO, se obtuvo la información de la ubicación de las estaciones existentes (08 estaciones), y se ha generado estaciones ficticias o virtuales (13 estaciones), con la finalidad de tener una mejor representatividad de la precipitación en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, la longitud de la información es de 36 años (1981 – 2016).

Para la lectura de los datos del producto PISCO, y extraer los valores de precipitación mensual, se construyó un pequeño código para el programa RStudio (script) el cual extrajo los valores de cada punto de interés (estaciones), este código se encuentra en el anexo B.

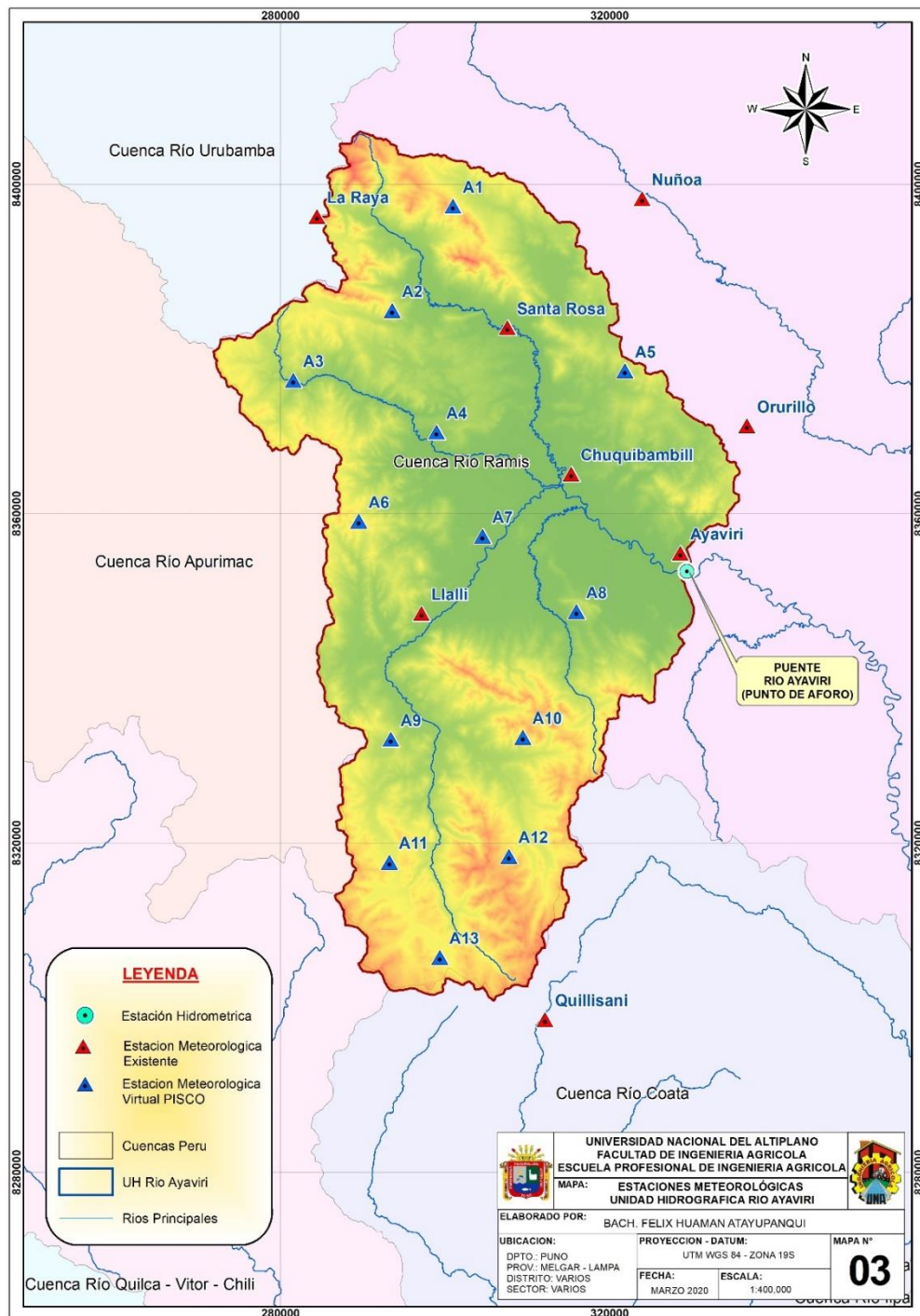
En la tabla 9, se muestra la ubicación y características de las estaciones pluviométricas existentes y virtuales, también se presenta el registro de la información pluviométrica generada para cada estación pluviométrica el cual se encuentra en el anexo C.

Tabla 9*Ubicación de las estaciones pluviométricas (Unidad hidrográfica del río Ayaviri)*

N°	Estación	Ubicación política			Ubicación geográfica		
		Dpto.	Provincia	Distrito	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
1	Ayaviri	Puno	Melgar	Ayaviri	14°52'21.6"	70°35'34.4"	3928.0
2	Chuquibambilla	Puno	Melgar	Umachiri	14°47'05.2"	70°42'56.5"	3971.0
3	La Raya	Cusco	Canas	Layo	14°30'00"	71°0'00"	4120.0
4	Llalli	Puno	Melgar	Llalli	14°56'11.5"	70°53'09.4"	3980.0
5	Nuñoa	Puno	Melgar	Nuñoa	14°29'00"	70°38'00"	4135.0
6	Orurillo	Puno	Melgar	Orurillo	14°44'00"	70°31'00"	3920.0
7	Quillisani	Puno	Lampa	Paratia	15°23'00"	70°45'00"	4600.0
8	Santa Rosa	Puno	Melgar	Santa Rosa	14°37'25.5"	70°47'11.5"	3966.0
9	A1	Puno	Melgar	Santa Rosa	14°29'23.8"	70°50'47.5"	4908.0
10	A2	Puno	Melgar	Santa Rosa	14°36'14.1"	70°54'58.4"	4720.0
11	A3	Puno	Melgar	Macari	14°40'46.1"	71°1'42.2"	4173.0
12	A4	Puno	Melgar	Macari	14°44'15.8"	70°52'2.2"	4006.0
13	A5	Puno	Melgar	Santa Rosa	14°40'19.8"	70°39'14.4"	4395.0
14	A6	Puno	Melgar	Macari	14°50'5.3"	70°57'21.0"	4774.0
15	A7	Puno	Melgar	Macari	14°51'7.9"	70°48'58.9"	3975.0
16	A8	Puno	Melgar	Ayaviri	14°56'9.1"	70°42'39.4"	4151.0
17	A9	Puno	Lampa	Ocuviri	15°4'27.9"	70°55'18.6"	4406.0
18	A10	Puno	Lampa	Ocuviri	15°4'23.7"	70°46'21.3"	4903.0
19	A11	Puno	Lampa	Ocuviri	15°12'33.3"	70°55'28.8"	4621.0
20	A12	Puno	Lampa	Ocuviri	15°12'14.1"	70°47'22.0"	4971.0
21	A13	Puno	Lampa	Ocuviri	15°18'50.3"	70°52'6.5"	4761.0

Figura 25

Ubicación de las estaciones pluviométricas e hidrométrica para la unidad hidrográfica del río Ayaviri



3.5.1.3 Información de temperatura

Los datos de temperatura mínima y máxima mensuales se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), mediante el producto PISCOt v.1.1, esta información presenta un período de 36 años comprendidos entre los años 1981-2016, y que es necesario para el cálculo de la evapotranspiración de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

3.5.1.4 Información hidrométrica

Se obtuvo la información de la estación hidrométrica del Puente Ayaviri, en la tabla 10, se muestra a detalle la ubicación de la estación, los datos son datos de escorrentía media mensual disponibles desde 1981 hasta 2016, esta estación se encuentra ubicada en el punto de salida de la unidad hidrográfica y es de gran interés porque registra el aporte hídrico total de la cuenca, el registro histórico de esta información se encuentra en el anexo A del presente documento.

Tabla 10

Ubicación de la estación hidrométrica Puente Ayaviri

Estación	Río	Ubicación política				Ubicación geográfica		
		País	Dpto.	Provincia	Distrito	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Pte. Ayaviri	Ayaviri	Perú	Puno	Melgar	Ayaviri	14°53'35.1"	70°35'09.9"	3900.0

3.5.1.5 Antecedentes

Los principales estudios de ingeniería recopilados para la presente investigación son:

- Estudio de “actualización del balance hídrico de la cuenca del río Ramis”, cuyos componentes fueron hidrología e inventario de fuentes de agua

superficial, realizado por el ex Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), en el año 2008.

- Memoria final del “Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica del río Ramis”, realizado por la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos (DCERH), de la Autoridad Nacional del Agua, en el año 2019.

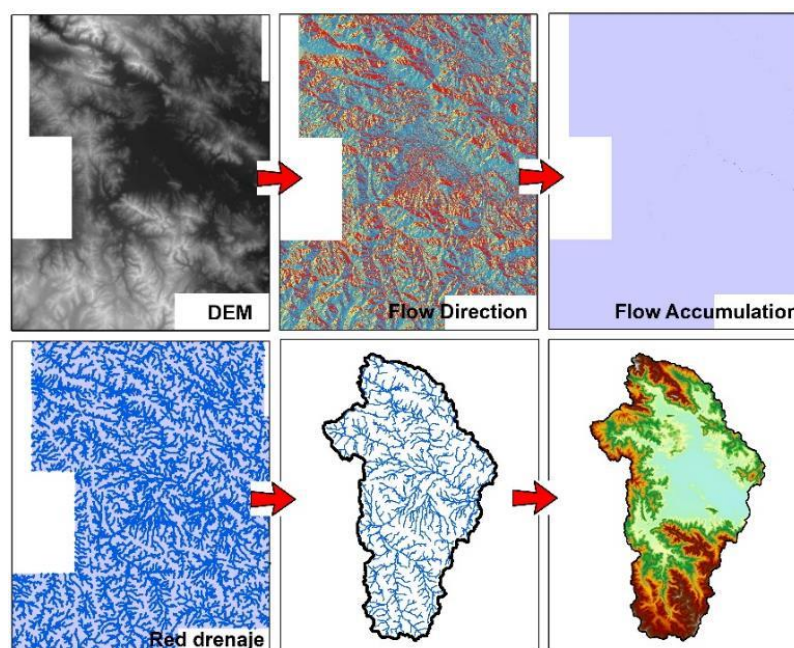
3.5.2 Análisis cartográfico de la unidad hidrográfica

3.5.2.1 Delimitación de la unidad hidrográfica

La delimitación de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se realizó con el Software ArcGIS 10.5, utilizando la herramienta Model Builder, el cual automatizo el proceso de la delimitación de la unidad hidrográfica, el trazado de la red hídrica, y la determinación de los principales parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica en base a la información topográfica o del modelo digital de elevación del satélite ALOS PALSAR de 12.5 m de pixel.

Figura 26

Delimitación de la unidad hidrográfica del río Ayaviri



3.5.2.2 Características geomorfológicas de la unidad hidrográfica

Aparicio Mijares (1992), menciona que el ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, “se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización” (p. 19).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física - espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, ofrecen conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Gaspari et al., 2013, p. 48).

“El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia” (Gaspari et al., 2013, p. 48).

3.5.2.2.1 Parámetros de forma de la cuenca

Estos parámetros o características de la cuenca son considerandos importantes, ya que relacionan el movimiento del agua y la respuesta de la cuenca a tal movimiento.

- **Área de la cuenca**

Según ANA (2010), es la superficie de la cuenca comprendida dentro de la curva cerrada de *divortium aquarum*. “La magnitud del área se obtiene mediante el planimetrado de la proyección del área de la cuenca sobre un plano horizontal.

Dependiendo de la ubicación de la cuenca, su tamaño influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, tanto directa como de flujo de base o flujo sostenido” (p. 45).

Tabla 11

Clasificación propuesta para las cuencas

Tamaño de la cuenca (km²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2500	Intermedia-grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Nota. Adaptado de Campos Aranda (1998).

La superficie total de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 3711.18 km².

- **Perímetro de la cuenca (P)**

ANA (2010), define “es la longitud de la línea de divortium aquarum. Se mide mediante el curvímetro o directamente se obtiene del Software en sistemas digitalizados” (p. 46).

El perímetro de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 350.45 km.

- **Longitud del río principal (L)**

ANA (2010), “es la longitud mayor de recorrido que realiza el río, desde la cabecera de la cuenca, siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades, hasta un punto fijo de interés, puede ser una estación de aforo o desembocadura, expresado en unidades de longitud” (p. 46).



La longitud del río principal de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 112.22 km.

- **Ancho promedio de la cuenca (A_p)**

ANA (2010), define que es la “relación entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal, cuya expresión es la siguiente”:

$$A_p = \frac{A}{L}$$

Donde:

A_p = Ancho promedio de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

L = Longitud del cauce principal (km).

El ancho promedio de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 33.07 km.

- **Coefficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (K_c)**

ANA (2010), parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro, al igual que el anterior, describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración de del sistema hidrológico.

“Las cuencas redondeadas tienen tiempos de concentración cortos con gastos pico muy fuerte y recesiones rápidas, mientras que las alargadas tienen gastos pico más atenuado y recesiones más prolongadas” (p. 46).

$$K_c = 0.282 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right)$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

Tabla 12

Clasificación del Índice de Compacidad de Gravelius

Kc	Clasificación
1 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
1.25 a 1.50	Oval redonda a oval-oblonga
1.50 a 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular

Nota. Adaptado de Gaspari et al. (2013).

El coeficiente de compacidad de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es 1.62, este valor es más cercano a 2 que a 1, indica que la cuenca es de forma alargada debiéndose estar menos expuesta a las crecientes que una cuenca de forma redondeada.

- **Factor de forma (Ff)**

Es la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado de la longitud máximo recorrido del cauce (L). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según que su factor de forma tienda hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca (ANA, 2010, p. 47).

$$Ff = \frac{A}{L^2}$$



Donde:

A = Área de la cuenca (km²).

L = Longitud del cauce principal (km).

Tabla 13

Rangos aproximados del factor de forma

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando al desagüe

Nota. Adaptado de Pérez (1979).

El Factor de Forma determinado para la unidad hidrográfica del río Ayaviri es 0.29, lo cual explica que la cuenca es de forma alargada, y estaría menos sujeta a crecientes continuas.

- **Radio de circularidad (R_c)**

Según ANA (2010), “relaciona el área de la cuenca y la del círculo que posee una circunferencia de longitud igual al perímetro de la cuenca. Su valor es uno (1) para una cuenca circular y 0.785 para una cuenca cuadrada” (p. 48).

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

El valor del radio de circularidad de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es 0.38 lo que indica que la cuenca es alargada, ya que el valor está por debajo de 0.785.

- **Rectángulo equivalente (RE)**

Según Villón B. (2002), el rectángulo equivalente es una transformación geométrica, que permite representar a la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo, que tiene la misma área y perímetro (y por lo tanto el mismo índice de compacidad o índice de Gravelius), igual distribución de alturas (y por lo tanto igual curva hipsométrica), e igual distribución de terreno, en cuanto a sus condiciones de cobertura. En este rectángulo, las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas al lado menor, siendo estos lados, la primera y última curvas de nivel (p. 42).

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$$

Donde:

L = Longitud del lado mayor del rectángulo (km).

l = Longitud del lado menor del rectángulo (km).

K = Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (km/km²).

A = Área de la cuenca (km²).

La longitud mayor y menor de la unidad hidrográfica del río Ayaviri son 152.07 km y 24.40 km.

3.5.2.2.2 Parámetros de relieve de la cuenca

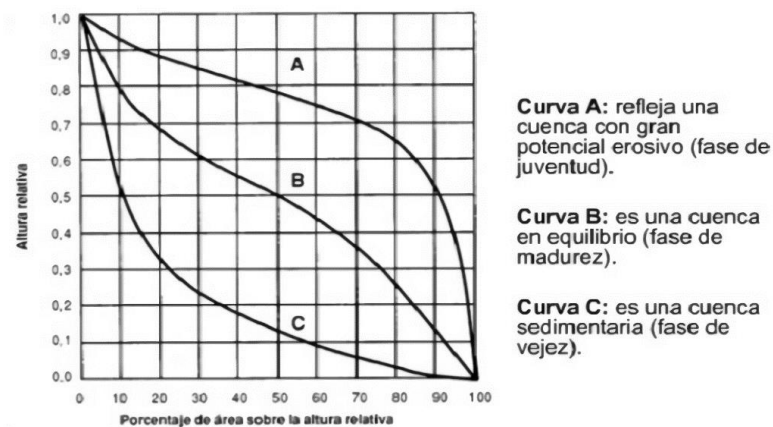
El relieve posee una incidencia más fuerte sobre la escorrentía que la forma, dado que a una mayor pendiente corresponderá un menor tiempo de concentración de las aguas en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Es así como a una mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal (ANA, 2010, p. 49).

- **Curva hipsométrica**

Se define como curva hipsométrica a la representación gráfica del relieve medio de la cuenca, construida llevando en el eje de las abscisas, longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca, en km^2 o en porcentaje, comprendidas entre curvas de nivel consecutivas hasta alcanzar la superficie total, llevando al eje de las ordenadas la cota de las curvas de nivel consideradas. Las Curvas hipsométricas también han sido asociadas con las edades de los ríos de las respectivas cuencas (ANA, 2010, p. 49).

Figura 27

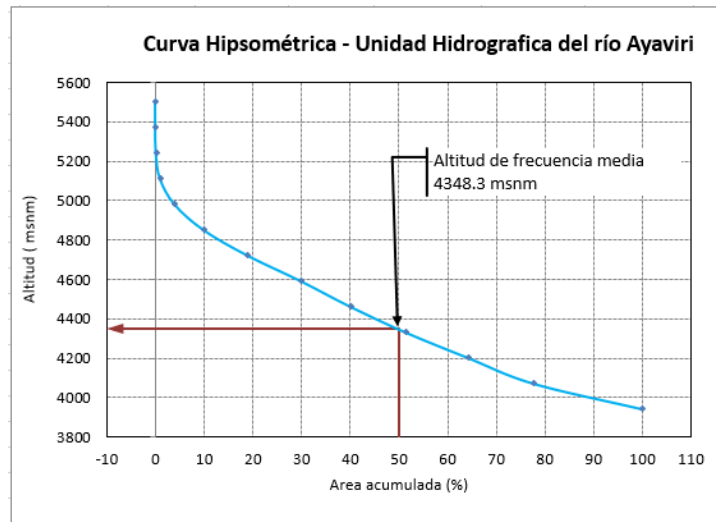
Tipos de curva hipsométrica



Nota. Adaptado de Rojas (2015).

Figura 28

Curva hipsométrica - Unidad hidrográfica del río Ayaviri



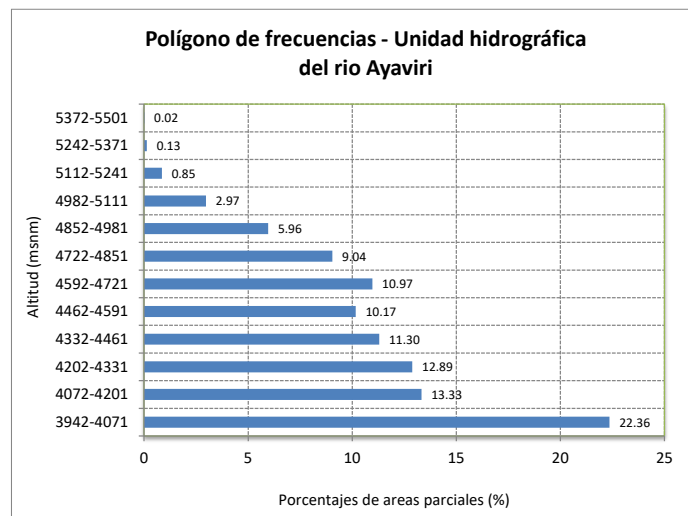
La unidad hidrográfica del río Ayaviri, según la curva hipsométrica generada, se asemeja a la curva C, por lo tanto, es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

- **Polígono de frecuencias de áreas parciales**

El polígono de frecuencias es un gráfico de barras de las áreas parciales (%) con respecto al intervalo de altitudes (msnm) que las encierran. Representa la variación de las áreas parciales comprendidas entre determinadas curvas de nivel consecutivas. Del polígono de frecuencias se puede obtener valores representativos como: la altitud más frecuente, que es el polígono de mayor porcentaje o frecuencia de áreas parciales (ANA, 2010, p. 50).

Figura 29

Polígono de frecuencias – Unidad hidrográfica del río Ayaviri



- **Altitud media de la cuenca**

Según ANA (2010), corresponde a la ordenada media de la curva hipsométrica, y su cálculo obedece a un promedio ponderado: elevación – área de la cuenca. La altura o elevación media tiene importancia principalmente en zonas montañosas donde influye en el escurrimiento y en otros elementos que también afectan el régimen hidrológico, como el tipo de precipitación, la temperatura, etc. (p. 45).

Para calcular la elevación media se utiliza la siguiente fórmula:

$$Hm = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot a_i)}{A}$$

Donde:

Hm = Elevación media de la cuenca (msnm).

Ci = Cota media del área i, delimitada por 2 curvas de nivel (msnm).

ai = Área i entre curvas de nivel (km²).

A = Área total de la cuenca (km²).

La altitud media de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 4393.3 msnm.

- **Altitud de frecuencia media**

“Es la altitud correspondiente al punto de abscisa media de la curva de frecuencia de altitudes, en ella, el 50% del área de la cuenca, está situado por encima de esa altitud y el 50% por debajo de ella” (ANA, 2010, p. 54).

La unidad hidrográfica del río Ayaviri, presenta una altitud de frecuencia media de 4348.3 msnm, y el área por encima de esta cota es de 1855.60 km² que representa el 50% del total de la superficie de la unidad hidrográfica.

- **Altitud más frecuente**

“Es la altitud predominante con mayor porcentaje de área de la cuenca” (ANA, 2010). En la figura 29, la altitud predominante se encuentra entre el intervalo de las cotas de 3942 a 4071 msnm, es donde se tiene mayor porcentaje de área de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

- **Pendiente media de la cuenca**

Este parámetro de relieve es importante debido a su relación con el comportamiento hidráulico de drenaje de la cuenca, y tiene una importancia directa en relación a la magnitud de las crecidas. Para su estimación se emplea el sistema del “Rectángulo Equivalente” (ANA, 2010, p. 54).

$$Sc = \frac{H}{L_m}$$



Donde:

Sc = Pendiente media de la cuenca.

H = Desnivel total (cota en la parte más alta - cota en la parte más baja),
en km.

Lm = Lado mayor del rectángulo equivalente (km).

La unidad hidrográfica del río Ayaviri tiene una pendiente media de 1.03
%.

3.5.2.2.3 Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca

La red hidrográfica corresponde al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca. La red de drenaje es, probablemente, uno de los factores más importantes a la hora de definir un territorio. De ella se puede obtener información en lo que concierne a la roca madre y a los materiales del suelo, a la morfología y a la cantidad de agua que circula, entre otros (ANA, 2010, p. 56).

Diversos autores coinciden en afirmar que mientras mayor sea el grado de bifurcación del sistema de drenaje de una cuenca, es decir, entre más corrientes tributarias presente, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al presentar una densa red de drenaje, una gota de lluvia deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor (ANA, 2010, p. 56).



- **Tipo corriente**

Según ANA (2010), una manera comúnmente usada para clasificar el tipo de corriente es tomar como base la permanencia del flujo en el cauce del río. Los tipos de corriente en una cuenca es la siguiente:

- Ríos perennes; son ríos que contienen el agua permanentemente todo el año.
- Ríos intermitentes; son ríos que en general contienen el agua sólo durante épocas de lluvia y se secan en épocas de estiaje.
- Ríos efímeros; son ríos que contienen el agua, sólo cuando llueve, después se secan (quebradas) (p. 57).

El río Ayaviri es de tipo Perenne, porque contiene agua permanentemente todo el año.

- **Número de orden de los ríos**

Es el grado de ramificación de las corrientes de agua, para su determinación se considera el número de bifurcaciones que tienen los tributarios, asignándoles un orden a cada uno de ellos en forma creciente desde su nacimiento hasta su desembocadura. De manera que el orden atribuido al curso nos indique el grado de ramificación del sistema de drenaje. Es decir, los ríos del primer orden son las corrientes que no tienen tributarios, dos ríos del primer orden forman un río de segundo orden, dos ríos de segundo orden forman un río de tercer orden y así sucesivamente hasta llegar al curso principal y finalmente se obtiene el grado de ramificación del sistema de drenaje de una cuenca (ANA, 2010, p. 57).

El río Ayaviri es de orden 6.



- **Frecuencia de densidad de ríos (Dr)**

Según ANA (2010), “es el número de ríos por unidad de superficie de la cuenca. Se encuentra al dividir el número total del curso de agua (N° ríos) entre el área total de la cuenca (A)” (p. 58), es decir, que:

$$Dr = \frac{N^{\circ} rios}{A}$$

Donde:

N° ríos = Número de ríos de la cuenca.

A = Área de la cuenca (km²).

La densidad de ríos en la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 0.34 ríos/km².

- **Densidad de drenaje (Dd)**

Según ANA (2010), “es la relación entre la longitud total de los cursos de agua: perennes, intermitentes o efímeros de la cuenca y el área total de la misma. Representa la cantidad de kilómetros de curso que existe por cada unidad de superficie” (p. 58).

$$Dd = \frac{L_r}{A}$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje (km/km²).

LT = Longitud total de ríos de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

Según Monsalve Sáenz (1999), la densidad de drenaje usualmente toma los valores siguientes:



- Entre 0.5 km/km², para hoyas con drenaje pobre.
- Hasta 3.5 km/km², para hoyas excepcionalmente bien drenadas.

La densidad de drenaje de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 0.63 km/km², el cual es mayor que 0.5 km/km² y menor que 3.5 km/km², lo que indica que la cuenca tendría drenaje regular y moderadamente propenso a las crecientes.

- **Extensión media del escurrimiento superficial (E)**

Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud total de la red hídrica de la misma cuenca. También se puede definir como la distancia promedio en línea recta que el agua precipitada tendría que recorrer para llegar al lecho de un curso de agua (ANA, 2010, p. 58).

El valor de la extensión media del escurrimiento superficial se determina con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{A}{L_T}$$

Donde:

A = área de la cuenca (km²).

L_T = longitud total de ríos de la cuenca (km).

Para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, la extensión media del escurrimiento superficial es de 1.60 km.

- **Pendiente media del río principal (Sm)**

La velocidad de la escorrentía superficial de los cursos de agua depende de la pendiente de sus cauces fluviales; así a mayor pendiente habrá mayor velocidad de escurrimiento. La pendiente media del río es un parámetro empleado

para determinar la declividad de una corriente de agua entre dos puntos extremos (ANA, 2010, p. 59).

“La pendiente media del cauce principal, según Taylor y Schwarz es la relación entre la diferencia de alturas y la longitud del curso principal” (ANA, 2010, p. 59).

$$S_m = \frac{(H_M - H_m)}{1000 \times L}$$

Donde:

S_m = Pendiente media del cauce principal (m/m).

L = Longitud del cauce principal (km).

H_M, H_m = Altura máxima y mínima del lecho del río principal, referidos al nivel medio de las aguas del mar (msnm).

El río principal de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, tiene una pendiente media de 0.009 m/m.

- **Altura media del río principal (H_m)**

Según ANA (2010), “es el valor medio entre las alturas de los extremos del río principal” (p. 59).

$$H_m = \frac{(H_M + H_m)}{2}$$

Donde:

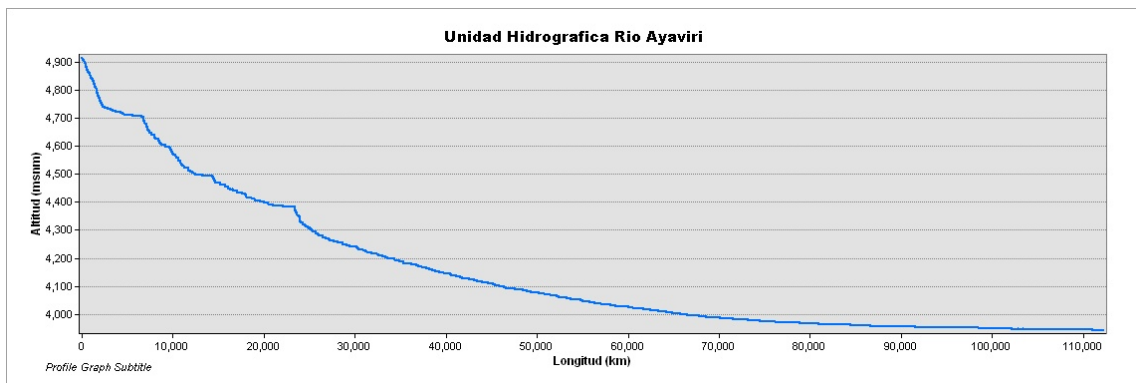
H_M = Altura máxima del lecho del río principal (msnm).

H_m = Altura mínima del lecho del río principal (msnm).

La altura media del cauce principal del río Ayaviri es 4429.87 msnm.

Figura 30

Perfil longitudinal del cauce principal – Unidad hidrográfica del río Ayaviri



- **Tiempo de concentración (T_c)**

“Este parámetro se refiere al tiempo que tarda el agua en su recorrido entre dos puntos determinados, los cuales son: en extremo superior de la cuenca y el punto donde se mide el flujo” (ANA, 2010, p. 62).

Existen muchas fórmulas empíricas para calcular el tiempo de concentración, para este caso se utiliza la fórmula de Kirpich con la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Dónde:

T_c= Tiempo de concentración (min).

L= Longitud del curso principal (m).

H = Diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal (m).

El tiempo de concentración de la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 15.63 h.

Tabla 14

Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Ayaviri

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
1.- Parámetros de forma de la cuenca			
Cota mínima de la unidad hidrográfica	Caf.	3942.00	msnm
Cota máxima de la unidad hidrográfica	Cmax.	5501.00	msnm
Cota máxima del cauce principal	Cca	4917.73	msnm
Desnivel total de la unidad hidrográfica	Hc	1.56	km
Diferencia Hcauce	Hca	0.976	km
Área de la unidad hidrográfica	A	3711.18	km ²
Perímetro de la unidad hidrográfica	P	350.45	km
Longitud del cauce principal	L	112.22	km
Longitud total de los ríos de diferentes grados			
Orden 1		1195.80	km
Orden 2		580.16	km
Orden 3		288.19	km
Orden 4		142.59	km
Orden 5		94.19	km
Orden 6		21.87	km
Longitud Total	Lt	2322.80	km
Ancho promedio de la unidad hidrográfica	Ap	33.07	km
Coefficiente de Compacidad o índice de Gravelius	Kc	1.62	
Factor de Forma	Ff	0.29	
Radio de circularidad	Rc	0.38	
Rectángulo equivalente			
Lado Mayor	L	152.07	km
Lado Menor	l	24.40	km
2.- Parámetros de relieve de la cuenca			
Cálculo de la curva Hipsométrica:		√	
Cálculo de frecuencias de áreas parciales:		√	
Altitud media de la cuenca	Hm	4393.3	msnm
Altitud de frecuencia media	Hfm	4348.3	msnm
Altitud más frecuente	Hf	3942-4071	msnm
Pendiente media de la cuenca (Criterio del rectángulo equivalente)	Sc	1.03	%
3.- Parámetros de la red hidrográfica de la cuenca			
Tipo de corriente		Perenne	
Numero de orden de los ríos		6to	Orden
Numero de ríos			
Orden 1		636	
Orden 2		291	
Orden 3		157	
Orden 4		103	
Orden 5		60	
Orden 6		22	
Numero de corrientes perennes e intermitentes	Nc	1269	n
Longitud total de los cursos de agua	Lt	2322.80	km
Frecuencia de densidad de ríos	Dr	0.34	n/km ²
Densidad de drenaje	Dd	0.63	km/km ²
Extensión media del escurrimiento superficial	E	1.60	km
Pendiente media del río principal (método pendiente uniforme)	Sm	0.87	%
Pendiente del cauce principal (Método Ecuación de Taylor y Schwarz)	S	0.24	%
Altura media del río principal	Hm	4429.87	msnm
Tiempo de concentración (Según Formula de Kirpich)	Tc	15.63	h



3.5.3 Análisis estadístico de la información hidrometeorológica

3.5.3.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

El análisis exploratorio de datos (AED) surge de los trabajos realizados por (Tukey, 1977), desde entonces su uso se ha venido incrementando, ya que se ha comprobado que el examen previo de los datos es un paso necesario. Este análisis toma su tiempo, y habitualmente se descuida por parte de los analistas de datos. Muchas veces las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico. El uso directo de la data sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre variables, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos (Lobo L. et al., 2006, p. 13).

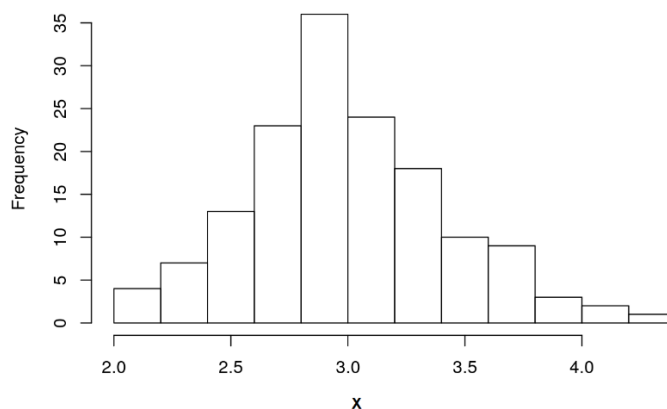
El AED consiste en el análisis de los datos empleando una variedad de técnicas (en su mayoría gráficas) para incrementar nuestro entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas. El AED es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística (Lobo L. et al., 2006, p. 13).

▪ Análisis gráfico de histogramas

El propósito del histograma es el de resumir gráficamente la distribución del conjunto univariado de datos. Este tipo de gráficos muestran en relación a los datos: a) el centro, b) la dispersión, c) la asimetría, d) la presencia de valores atípicos y e) la ocurrencia de múltiples modas, que son utilizados como indicadores de modelos de distribución apropiado para los datos (Lobo L. et al., 2006, p. 15).

Figura 31

Representación gráfica de un histograma

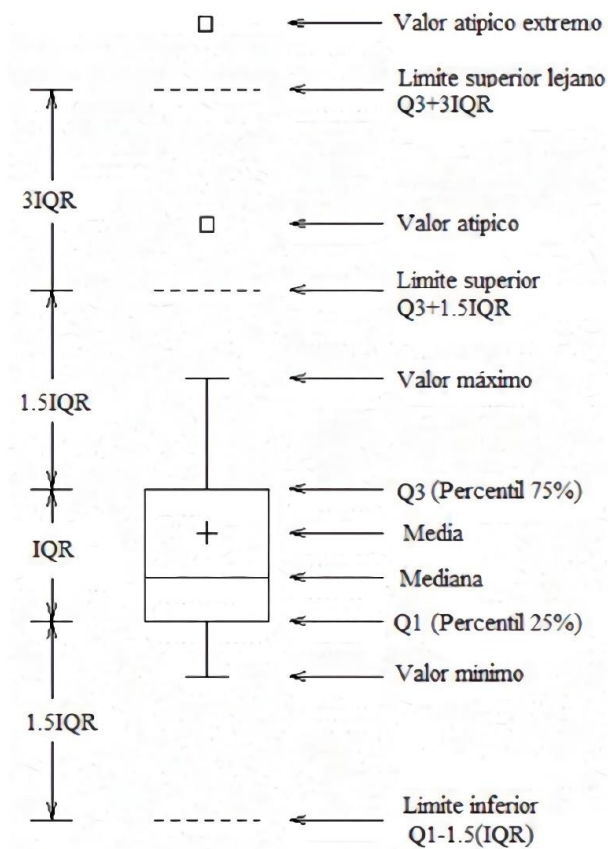


▪ Diagrama de caja o box plot

“Es utilizado para obtener información relativa a la concentración y variación de los datos. Cuando se obtienen varias de ellas permiten ilustrar los cambios en las medidas de concentración y la variación entre conjuntos de datos” (Lobo L. et al., 2006, p. 15).

Figura 32

Partes de un diagrama de caja



3.5.3.2 Análisis de consistencia

▪ Análisis de la homogeneidad de series de datos

Los datos climáticos recogidos en una determinada estación hidrometeorológica durante un periodo de varios años puede que no sean homogéneos, es decir, el registro de una variable climática en particular puede presentar un cambio repentino en su media y por lo tanto una variación en lo referente a los valores previos. Este fenómeno puede ocurrir debido a varias causas, algunas de las cuales se relacionan con los cambios en el manejo y observación de los instrumentos, y otras que se relacionan con la modificación de las condiciones ambientales del sitio de recolección de datos (FAO, 2006).

“Estos cambios provocan que las observaciones hechas antes del cambio pertenezcan a una población estadísticamente diferente a la de los datos recogidos después del cambio” (FAO, 2006).

Se recurren a técnicas estadísticas para poder determinar la homogeneidad de una serie de datos, sin embargo, previo a estos análisis se recomienda agrupar las estaciones tratando de que representen a una misma zona climática.

Vector regional

“El MVR es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: La crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación” (Espinoza, 2005, p. 1).

La hipótesis fundamental en la que se basa, consiste en asumir que, para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con una pequeña variación aleatoria cada año debido a la repartición de las lluvias dentro de la zona. La idea básica del MVR, es la siguiente: en lugar de comparar dos por dos estaciones por correlación o doble masa, como se hace en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones (Espinoza, 2005, p. 1).

El paquete computacional HYDRACCESS, ejecuta el MVR y proporciona información diversa en hojas de cálculo Microsoft Excel. La determinación de la calidad de una estación, es función de diferentes parámetros calculados; los parámetros más importantes, que dan una buena idea del comportamiento de una estación son: (a) La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor fuerte indica desviaciones

fuertes. (b) Correlación entre la estación y el vector, si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona (Espinoza, 2005, p. 2).

3.5.3.3 Análisis de saltos y tendencias

3.5.3.3.1 Análisis de saltos

▪ Distribución Free CUSUM

En el control estadístico de la calidad, el CUSUM (o gráfico de control de la suma acumulada) es una técnica de análisis secuencial desarrollada por ES Page de la Universidad de Cambridge. Es un test estadístico no paramétrico para cambio en la media/mediana.

Las figuras y tablas de CUSUM se han utilizado en hidrología para detectar cambios en la lluvia y la descarga de los ríos (Kundzewicz & Robson, 2000).

Las variables para este método son:

N : Cantidad total de datos.

n : Cantidad de datos pasando el año de cambio en la tendencia.

m : Cantidad de datos antes el año de cambio en la tendencia

Q_i : Caudal mensual promedio o caudal anual en m^3/s .

Q_{med} : Caudal promedio de todos los valores mensuales o anuales en m^3/s .

$N = m+n$

$$\text{sign}(Q_i - Q_{med}) = 1 \rightarrow Q_i - Q_{med} > 0$$

$$\text{sign}(Q_i - Q_{med}) = -1 \rightarrow Q_i - Q_{med} < 0$$

$$V_k = \sum_{i=1}^{i=N} \text{sign}(Q_i - Q_{med})$$

Se analizó el valor absoluto de V_k para saber cuál es el máximo de ellos para todos los años, esto nos indicó en que año ocurrió un cambio en la tendencia de los datos, así mismo, nos dijo cuántas veces se ha repetido dicho valor.

$\text{abs}(V_k)$: Valor absoluto de V_k

$$|V_k| = \text{abs}(V_k)$$

$\max(|V_k|)$: Máximo valor absoluto de V_k

$\text{Cant}(|V_k|)$: Cantidad de veces que se repite el valor máximo absoluto de V_k

$N^\circ \text{ tail}(Z)$: Número de tallos o tail que tiene la serie

▪ Rank-Sum

Rank Sum es un test estadístico no paramétrico para diferencias en media/mediana en dos diferentes periodos de la serie o datos.

Al tener el año de cambio en la tendencia de los datos mediante el método no paramétrico de Free Cusum podremos aplicar este método para conocer en base a Z el valor de a , el cual es el valor de significancia (Kundzewicz & Robson, 2000). Las variables usadas son:

Q_i : Caudal mensual promedio o caudal anual en m^3/s .

Q_{med} : Caudal promedio de todos los valores mensuales o anuales en m^3/s .

N : Cantidad total de datos.

n : Cantidad de datos pasando el año de cambio en la tendencia.

m : cantidad de datos antes el año de cambio en la tendencia.



La jerarquía de un número es su tamaño en comparación con otros valores de la lista. Si ordenara la lista, la jerarquía del número sería su posición.

JER (Q_i): Valor entero de la posición de un conjunto de datos puede variar entre 1 y N.

$$S = \sum_{i=m}^{i=N} JER(Q_i)$$

$$M = \frac{n(m+1)}{2}$$

$$s = \sqrt{\frac{(n)(m)(N+1)}{12}}$$

Para encontrar el valor de Z_{rs} se usan las siguientes condiciones:

$$Z_{rs} = \frac{s - 0.5 - M}{s} \rightarrow s - M > 0$$

$$Z_{rs} = \frac{s + 0.5 - M}{s} \rightarrow s - M < 0$$

Existe una relación entre Z_{rs} , a y tail (Z). El inverso de la distribución normal estándar acumulativa. La distribución tiene una media de cero y una desviación estándar de uno.

DNEI: Distribución normal estándar inversa

$$Z_{rs} = DNEI\left(1 - \frac{a}{N^{\circ}tail(Z)}\right)$$

3.5.3.3.2 Análisis de tendencias (estacionariedad)

▪ Mann-Kendall

La prueba utiliza los datos hidrológicos sin procesar, (sin suavizar) para detectar posibles tendencias.

La estadística de Kendall fue diseñada originalmente por Mann (1945) como una prueba no paramétrica de tendencia. Más tarde, la distribución exacta de la estadística de prueba fue derivada por Kendall (1975). La prueba de Mann-Kendall se basa en el estadístico de prueba S definido de la siguiente manera:

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^N \text{sign}(Q_j - Q_k)$$

Los datos se enumeran en el orden en el que se recopilaban a lo largo del tiempo (es decir, $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ obtenidos en los momentos 1, 2, 3, ... N).

El signo de todas las $n(n-1)/2$ posibles diferencias $Q_j - Q_k$ donde $j > k$ (es decir, $Q_2 - Q_1, Q_3 - Q_1, \dots, Q_N - Q_{N-2}, Q_N - Q_{N-1}$).

El signo de todas las diferencias posibles se calcula, es decir:

$$\text{sign}(Q_j - Q_k) = 1 \rightarrow Q_j - Q_k > 0$$

$$\text{sign}(Q_j - Q_k) = 0 \rightarrow Q_j - Q_k = 0$$

$$\text{sign}(Q_j - Q_k) = -1 \rightarrow Q_j - Q_k < 0$$

La estadística de prueba, S , es igual al número total de diferencias positivas menos el número de diferencias negativas para cada paso de tiempo.

N : número de datos

$$\text{Suma} = \sum_0^N S$$

Mann (1945) y Kendall (1975) han documentado que cuando, el estadístico S se distribuye aproximadamente con la media y la varianza de la siguiente manera:

Var: Varianza.

$$Var = \frac{(Suma)(Suma-1)(2Suma+5)}{18}$$

$$Z = \frac{Suma}{\sqrt{Var}}$$

$$|Z| = abs(Z)$$

3.5.4 Determinación de la precipitación media areal de la unidad hidrográfica del río Ayaviri

La precipitación media areal es aquella precipitación hidrológica que cae sobre el área de una cuenca específica, y se determina utilizando los métodos de: media aritmética, polígonos de Thiessen, las Isoyetas, Distancia Inversa Ponderada (IDW) y Kriging, que son los más usados en la hidrología.

La precipitación media areal de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se determinó empleando los métodos de Polígonos de Thiessen, Distancia Inversa Ponderada (IDW) y Kriging, para ello se usó el Software Hydraccess.

3.5.4.1 Método de Polígonos de Thiessen

Este método establece que en cualquier punto de la cuenca la precipitación es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de influencia en una

red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes (ANA, 2019, p. 195).

$$p_m = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i$$

Donde:

P_m = Precipitación areal de la cuenca.

P_i = Precipitación de la estación i .

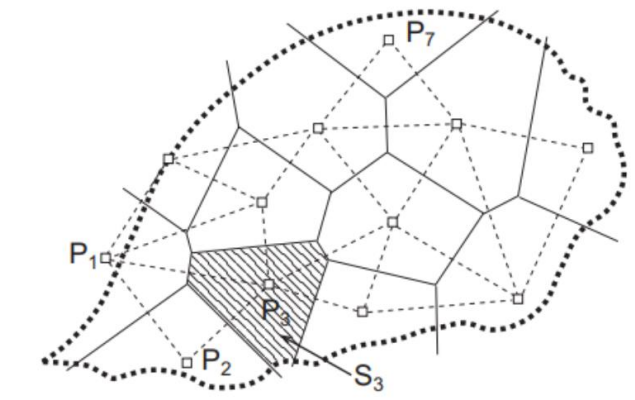
A_i = Área de influencia de la estación i .

A_T = Área total de la cuenca.

n = Número de estaciones de análisis.

Figura 33

Polígonos de Thiessen



Nota. Adaptado de ANA (2019).

3.5.4.2 Distancia Inversa Ponderada (IDW)

El IDW es un método avanzado de la técnica del vecino más próximo que utiliza la distancia de los puntos con datos hacia el punto desconocido, asignando un peso a los diferentes puntos con datos. Este método asume que cada punto

posee una influencia local que disminuye con la distancia; de esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia (Tveito & Schöner, 2002, p. 11).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}}$$

Donde:

P_m = Precipitación areal de la cuenca.

P_i = Precipitación de la estación i .

D_i = Distancia entre la estación i y el centroide de la cuenca.

n = Número de estaciones de análisis.

3.5.4.3 Kriging

El método del Kriging es probablemente el más exacto, pero requiere más tiempo de procesamiento. El método requiere una grilla, consiste en establecer para cada punto de la grilla un variograma que evalúa la influencia de las estaciones próximas en función de su distancia al punto, y de su rumbo. El Kriging es así el único método que puede tomar en cuenta un eventual gradiente espacial de la información (ANA, 2019).

3.5.5 Aplicación del modelo hidrológico de Lutz Scholz

Para la presente investigación ha sido seleccionado el modelo hidrológico de Lutz Scholz, debido a que el lugar de estudio tiene las características y condiciones necesarias para el cual el modelo ha sido establecido.

Para establecer el balance hídrico para un año promedio, se debe considerar el ciclo hidrológico de la cuenca. En el desarrollo del modelo hidrológico Lutz Scholz, se debe tomar en cuenta que la sierra altiplánica del Perú presenta dos épocas definidas: la época de avenidas y la época de estiaje; por lo tanto, los componentes del balance hídrico a nivel mensual serán diferentes para cada época, reflejándose tal condición en la ecuación de balance hídrico (ANA, 2010).

Siguiendo las recomendaciones del modelo, “la aplicación del modelo de precipitación descarga de Lutz Scholz comprende tres etapas bien definidas y se presenta en el siguiente organigrama” (Tarazona Santos, 2005).

Tabla 15

Metodología del modelo de Lutz Scholz

Modelo de Lutz Scholz		
Análisis cartográfico y estadístico de la información	Aplicación de los modelos determinísticos parciales	Generación de caudales para un periodo extendido
<ul style="list-style-type: none">• Análisis cartográfico de la cuenca.• Análisis y regionalización de la información hidrometeorológica.	<ul style="list-style-type: none">• Precipitación media• Coeficiente de escurrimiento• E.T.P• Precipitación efectiva• Fundamentos del balance hídrico• Periodos del ciclo hidrológico• Calculo de la retención en la cuenca• Gastos de la retención y abastecimiento de la retención• Caudal para el año promedio	<ul style="list-style-type: none">• Generación con el modelo marcoviano de primer orden• Validación mediante pruebas estadísticas a la media y desviación estándar

Nota. Adaptado de Tarazona Santos (2005).

3.5.5.1 Precipitación media areal de la cuenca

Para calcular esta precipitación, se pueden utilizar los métodos de: media aritmética, polígonos de Thiessen, las Isoyetas, Distancia Inversa Ponderada (IDW) y Kriging.

3.5.5.2 Balance hídrico

Según Lutz Scholz (1980), la ecuación fundamental del balance hídrico mensual expresada en mm/mes se describe de la siguiente forma:

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i$$

Donde:

CM_i = Caudal mensual (mm/mes)

P_i = Precipitación total mensual sobre la cuenca (mm/mes)

D_i = Déficit de escurrimiento (mm/mes)

G_i = Gasto de la retención en la cuenca (mm/mes)

A_i = Abastecimiento de la retención (mm/mes)

Asumiendo que para periodos de largos (en este caso 1 año) el gasto y abastecimiento de la retención tienen el mismo valor es decir $G_i = A_i$, y que para el año promedio una parte de la precipitación retorna a la atmósfera por evaporación. Reemplazamos (P-D) por (C*P), y tomando en cuenta la transformación de unidades (mm/mes a m³/s) la ecuación anterior se convierte en: (Lutz Scholz, 1980).

$$Q = c' \times C \times P \times A \times R$$

Donde:

Q = Descarga (m³/s)



- c' = Coeficiente para la conversión del tiempo (mes/s)
 C = Coeficiente de escurrimiento (1)
 P = Precipitación total mensual (mm/mes)
 AR = Área de la cuenca (m^2)

3.5.5.3 Coeficiente de escurrimiento

Uno de los métodos para calcular el coeficiente de escurrimiento es la fórmula desarrollada por L. Turc sobre la base de observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas alrededor del globo, cuya expresión es el siguiente:

$$C = \frac{P - D}{P}$$

Donde:

- C = Coeficiente de escurrimiento (mm/año)
 P = Precipitación Total anual (mm/año)
 D = Déficit de escurrimiento (mm/año)

Para el cálculo del D y el L se utilizan las siguientes expresiones:

$$D = P \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3$$

Siendo:

- L = Coeficiente de temperatura
 T = Temperatura media anual ($^{\circ}C$)



Otra opción para el cálculo del coeficiente de escurrimiento, es el método de la misión alemana, que es válida para toda la sierra peruana, cuya ecuación es:

$$\hat{C} = 3.16 E12 (P^{-0.571})(EP^{-3.686}) \quad r = 0.96$$

$$\hat{D} = -1380 + 0.872(P) + 1.032(EP); \quad r = 0.96$$

Donde:

- C = Coeficiente de escurrimiento
D = Déficit de escurrimiento (mm/año)
P = Precipitación total anual (mm/año)
EP = Evapotranspiración anual según Hargreaves (mm/año)
r = Coeficiente de correlación

3.5.5.4 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial, se ha calculado mediante la fórmula de Hargreaves, en base a la radiación solar y temperatura.

$$EP = 0.0075(RSM)(TF)(FA)$$

$$RSM = 0.075(RA)\sqrt{\left(\frac{n}{N}\right)}$$

$$FA = 1 + 0.06(AL)$$

Donde:

- EP = Evapotranspiración potencial anual (mm/año)
RSM = Radiación solar media
TF = Componente de temperatura
FA = Coeficiente de corrección por elevación
TF = Temperatura media anual (°Fahrenheit)



RA	=	Radiación extraterrestre (mm H ₂ O/año)
n/N	=	Relación entre insolación actual y posible (%)
n/N	=	50% (estimación sobre base de registros)
AL	=	Elevación media de la cuenca (km)

“La temperatura anual de la cuenca se calcula en base a datos registrados en las estaciones de referencia teniendo en cuenta una gradiente de temperatura de -5.3 °C 1/ 1000 m, que se determinó para la sierra” (Lutz Scholz, 1980).

3.5.5.5 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se calculó para el coeficiente de escurrimiento promedio, de tal forma que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total resulta igual al coeficiente de escurrimiento. Para este cálculo se adoptó el método de United States Bureau of Reclamación (USBR) para la determinación de la porción de lluvias que es aprovechable para cultivos (Lutz Scholz, 1980).

“El Bureau Reclamación llama a esta cantidad la precipitación efectiva de los cultivos que en realidad es el antítesis de la precipitación de escorrentía anteriormente mencionada” (Lutz Scholz, 1980).

“Para la hidrología se toma como precipitación efectiva esta parte de la precipitación total mensual que sale como el déficit según el método original del USBR” (Lutz Scholz, 1980).

El cálculo de la precipitación efectiva, se realiza utilizando la ecuación de un polinomio de quinto grado:

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5$$

Donde:

PE = Precipitación efectiva mensual (mm/mes).

P = Precipitación total mensual (mm/mes).

a_i = Coeficiente del polinomio.

En la tabla 16 se muestra los valores límites de la precipitación efectiva y la tabla 17 muestra los tres juegos de coeficientes a_i , que permiten alcanzar por interpolación valores de C, comprendidos entre 0.15 y 0.45.

Tabla 16

Límite superior para la precipitación efectiva

Curva N°	Ecuación	Rango
Curva I	PE = P - 120.6	P > 177.8 mm/mes
Curva II	PE = P - 86.4	P > 152.4 mm/mes
Curva III	PE = P - 59.7	P > 127.0 mm/mes

Nota. Adaptado de Lutz Scholz (1980).

Tabla 17

Coefficientes para el cálculo de la precipitación efectiva

a_i	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	-1204 E-8	4349 E-8	5534 E-8
a_4	144 E-9	-89.0 E-9	124 E-9
a_5	-285 E-12	-879 E-13	-142 E-11

Nota. Adaptado de Lutz Scholz (1980).

“De este modo es posible llegar a la relación entre la precipitación efectiva y precipitación total de manera que el volumen anual de la precipitación efectiva sea igual al caudal anual de la cuenca respectiva” (Lutz Scholz, 1980).

$$C = \frac{Q}{P} = \sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P}$$



Donde:

C = Coeficiente de escurrimiento,

Q = Caudal anual,

P = Precipitación total anual.

$\sum_{i=1}^{12} PE_i$ = Suma de la precipitación efectiva mensual

El valor de “C” (coeficiente de escurrimiento) promedio indica aproximadamente cual es la combinación de curvas que se debe utilizar. Por ejemplo, las combinaciones pueden ser: I y II ó II y III; también la decisión de optar por una de las combinaciones lo dará el cálculo de los coeficientes de ponderación, que debe ser un numero positivo entre cero y uno.

Asumiendo que la primera combinación es la que cumple los requisitos, entonces se calcula la “PE” con los polinomios de las curvas I y II:

$$PEI = -0.018 - 0.01850 * P + 0.001105 * P^2 - 1204 E-8 * P^3 + 144 E-9 * P^4 - 285 E-12 * P^5$$

$$PEII = -0.021 + 0.1358 * P - 0.002296 * P^2 + 4349 E-8 * P^3 - 89.0 E-9 * P^4 - 879 E-13 * P^5$$

Luego los coeficientes de ponderación se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$C1 = \frac{C * P - PEII}{PEI - PEII}$$

$$C2 = \frac{C * P - PEI}{PEII - PEI}$$

Condición: $C1 + C2 = 1$, si no se cumple esta condición, probar con la siguiente combinación, es decir: II y III.

Así, la precipitación efectiva “PE” característica mensual para el ejemplo, se calcula de la siguiente manera:

$$PE = C1 * PEI + C2 * PEII$$



Donde:

C1, C2 = Coeficientes de ponderación de las curvas I y II.

PEI, PEII = Precipitación efectiva calculada por la curva I y II.

PE = Precipitación efectiva característica media mensual (mm).

C = Coeficiente de esorrentía “C” promedio.

P = Precipitación mensual total (mm)

3.5.5.6 Retención en la cuenca (contribución de la retención)

Según Lutz Scholz, (1980), suponiendo que para el año promedio exista un equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de la reserva de la cuenca y admitiendo, además, que el caudal total sea igual a la precipitación efectiva anual, se puede calcular la contribución de la reserva hídrica al caudal según la fórmula siguiente:

$$R_i = CM_i - PE_i$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i$$

Donde:

Ri = Retención de la cuenca (mm/mes)

CMi = Caudal mensual (mm/mes).

PEi = Precipitación efectiva mensual (mm/mes).

Gi = Gasto de la retención de la cuenca (mm/mes).

Ai = Abastecimiento de la retención de la cuenca (mm/mes).

Ri = Gi para valores mayores de cero (mm/mes).

Ri = Ai para valores menores de cero (mm/mes).

Sumando todos los valores de gasto o abastecimiento, se halla la retención total R de la cuenca para el año promedio en (mm/año). Por definición R es igual



al gasto total G durante la estación seca y además igual al abastecimiento total A durante la estación lluviosa (ANA, 2010, p. 219).

3.5.5.7 Relación entre descargas y retención

Durante la estación seca el gasto de la retención alimenta los ríos y mantiene la descarga básica. La reserva o retención de la cuenca se agota al final de la estación seca; durante esta estación la descarga se puede calcular en base a la ecuación (Lutz Scholz, 1980):

$$Q_t = Q_o * e^{-a*t}$$

Donde:

- Qt = Descarga en el tiempo t
- Qo = Descarga inicial
- a = Coeficiente de agotamiento
- t = Tiempo

Al principio de la estación lluviosa el proceso de agotamiento de la reserva termina y parte de las lluvias más abundantes entra en los almacenes hídricos. El proceso de abastecimiento se muestra por un déficit entre la precipitación efectiva y el caudal real. Analizando los hidrogramas de la contribución de la retención a los caudales, se constata que el abastecimiento es más fuerte al principio de la estación lluviosa y cuando los almacenes naturales – lagunas, pantano, nevados y los acuíferos ya están recargados parcialmente, la restitución acaba poco a poco (Lutz Scholz, 1980).

3.5.5.8 Coeficiente de agotamiento (a)

Se constata que el coeficiente “a” no es constante durante toda la estación seca, sino que disminuye poco a poco. Para el cálculo práctico, estos fenómenos



no son decisivos y se pueden despreciar la variación del coeficiente “a” durante la estación seca empleando un valor promedio del coeficiente. De mayor importancia es la dependencia conocida del coeficiente de agotamiento del área de la cuenca en forma logarítmica (Lutz Scholz, 1980):

$$a = f(\text{Ln } AR)$$

Según Lutz Scholz (1980), para el cálculo del coeficiente “a”, recomienda el uso de cuatro ecuaciones que son para cuatro clases de cuencas, las cuales son:

Agotamiento muy rápido, cuencas con temperatura elevada mayor de 10 °C y retención reducida (50 mm/año) hasta retención mediana (80 mm/año).

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.034$$

Agotamiento rápido, por la retención en 50 y 80 mm/año y vegetación poco desarrollada (puna).

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.030$$

Agotamiento mediano, por retención mediana (alrededor de 80 mm/año) y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados).

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.026$$

Agotamiento reducido, por alta retención (más de 100 mm/año) y vegetación mezclada.

$$a = -0.00252\text{Ln}(AR) + 0.023$$

Donde:

a = Coeficiente de agotamiento por día.

AR = Área de la cuenca (km²).

Ln = Logaritmo natural o neperiano.

Se puede determinar el coeficiente de agotamiento real de la cuenca mediante varios aforos en el río durante la estación seca. Pero cuando no exista ningún aforo o solamente una observación, se utiliza una de las ecuaciones empíricas según la predominancia de los criterios anteriormente mencionados (Lutz Scholz, 1980).

3.5.5.9 Almacenamiento hídrico

Los acuíferos, lagunas y pantanos, y nevados, son tres tipos de almacenes naturales de agua que influyen en la retención de la cuenca.

Tabla 18

Lámina de agua acumulada en los tres tipos de almacén hídrico

Tipo	Lámina acumulada (mm/año)		
	Pendiente de la cuenca		
Napa freática	2%	8%	15%
	300	250	200
Lagunas – Pantanos	500		
Nevados	500		

Nota. Adaptado de Lutz Scholz, (1980).

La determinación de la lámina "L" que almacena cada tipo de estos almacenes está dado por:

Acuíferos:

$$L_A = -750(I) + 315$$

Siendo:

LA = Lámina específica de acuíferos (mm/año)

I = Pendiente de desagüe: $I \leq 15\%$

Lagunas y Pantanos:

$$LL = 500 \text{ mm/año}$$

Siendo:



LL = Lámina específica de lagunas y pantanos

Nevados:

$$LN = 500 \text{ mm/año}$$

Siendo:

LN = Lámina específica de nevados

3.5.5.10 Cálculo de gasto de la retención (G)

La contribución mensual de la retención, en el periodo seco durante el año, se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$G_i = \left(\frac{b_i}{\sum_{i=1}^m b_i} \right) \times R$$

Donde:

G_i = Gasto de la retención para el mes i (mm/mes).

R = Retención de la cuenca (mm/mes)

m = Número de meses de estiaje.

$\sum_{i=1}^m b_i$ = Sumatoria de la retención entre el caudal del mes i y el caudal

inicial (Coeficiente del gasto de la retención).

b_i = Relación entre el caudal del mes actual y anterior (coeficiente del gasto de la retención).

Cabe indicar que el coeficiente del gasto de la retención, se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$b_i = e^{-at}$$



Dónde:

b_i = Relación entre el caudal del mes actual y anterior (coeficiente del gasto de la retención).

a = Coeficiente de agotamiento.

t = Número de días del mes, es acumulativo para los meses siguientes.

3.5.5.11 Abastecimiento de la retención de la cuenca (A)

“Es el volumen de agua que retiene la cuenca durante la época de lluvias, almacenando naturalmente en acuíferos, lagunas, pantanos y nevados como reserva hídrica. Para posteriormente alimentar al río en época de estiaje” (ANA, 2010, p. 221).

El abastecimiento durante la época lluviosa es uniforme para cuencas ubicadas en la misma región climática. En la región del Cusco el abastecimiento comienza en el mes de noviembre con 5%, alcanzando hasta enero el valor del 80 % del volumen final. Las precipitaciones altas del mes de febrero completan el 20 % restante, y las precipitaciones efectivas del mes de marzo escurren directamente sin contribuir a la retención (Lutz Scholz, 1980).

Tabla 19

Coefficientes de almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (Valores de “ a_i ” en %)

Región	Ene	Feb	Mar	Oct	Nov	Dic	Total
Cusco	40	20	0	0	5	35	100
Huancavelica	30	20	5	10	0	35	100
Junín	30	30	5	10	0	25	100
Cajamarca	20	25	35	25	-5	0	100

Nota. Adaptado de Lutz Scholz (1980).

“La lámina de agua que entra en la reserva de la cuenca se muestra en forma de un déficit mensual de la precipitación efectiva mensual y se calcula mediante la siguiente expresión” (Lutz Scholz, 1980):

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

Siendo:

A_i = Abastecimiento mensual déficit de la precipitación efectiva
(mm/mes)

a_i = Coeficiente de abastecimiento (%)

R = Retención de la cuenca (mm/año)

3.5.5.12 Caudal mensual para el año promedio

“La lámina de agua que corresponde al caudal mensual para el año promedio se calcula según la ecuación básica del balance hídrico a partir de los componentes descritos anteriormente” (Lutz Scholz, 1980).

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i$$

Donde:

CM_i = Caudal del mes i (mm/mes).

PE_i = Precipitación efectiva del mes i (mm/mes).

G_i = Gasto de la retención en el mes i (mm/mes).

A_i = Abastecimiento de la retención en el mes i (mm/mes).

3.5.5.13 Generación de caudales mensuales para períodos extendidos

A fin de generar una serie sintética de caudales para períodos extendidos, se ha implementado un modelo estocástico que consiste en una combinación de

un proceso markoviano de primer orden, según la ecuación, con una variable de impulso, que en este caso es la precipitación efectiva en la ecuación (Lutz Scholz, 1980).

$$Q_t = f(Q_{t-1})$$

$$Q_t = g(PE_t)$$

“Para aumentar el rango de los valores generados y obtener una aproximación óptima a la realidad, se utiliza además, una variable aleatoria” (Lutz Scholz, 1980).

$$Z = zS(i - r^2)^{\frac{1}{2}}$$

“La ecuación integral para la generación de caudales mensuales combinando los componentes anteriormente citados, se escribe” (Lutz Scholz, 1980):

$$Q_t = b_1 + b_2 Q_{t-1} + b_3 PE_t + S.Z_t \sqrt{1 - R^2}$$

Donde:

Q_t = Caudal del mes t.

Q_{t-1} = Caudal del mes anterior (t-1).

PE_t = Precipitación efectiva del mes t.

S = error estándar del estimado.

Z_t = variable aleatoria normal independiente (0, 1) del mes t.

R^2 = coeficiente de determinación múltiple.

b_1, b_2, b_3 = Coeficientes de regresión lineal múltiple.

b_1 = Factor constante (caudal básico).

Según ANA (2010), menciona que el “procedimiento para la generación de descargas medias mensuales para períodos extendidos es la siguiente:”

- Cálculo de los parámetros del modelo b_1 , b_2 , b_3 , S y R^2 ; con el resultado de la generación de caudales mensuales para el año promedio, efectuando la regresión lineal múltiple entre el caudal del mes t (Q_t) como variable dependiente, caudal del mes anterior (Q_{t-1}) y la precipitación efectiva del mes t (PE_t) como variables independientes.
- Cálculo de la precipitación efectiva mensual para el registro de la precipitación areal mensual de la cuenca.
- Generación de números aleatorios normales independientes con distribución normal con media cero y variancia unitaria (0, 1).
- Generación de descargas medias mensuales para períodos extendidos con la información de los pasos anteriores mediante la ecuación integral (p. 223).

3.5.5.14 Test estadísticos

Según Lutz Scholz (1980), la calidad de la coincidencia de los caudales de los caudales generados con los observados, se lleva a cabo mediante comparación de los promedios y desviaciones tipo de ambos valores. Se prueba si los promedios salen de la misma población, es decir, son iguales mediante el test de student.

$$\hat{t} = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{(s_1^2 + s_2^2)}{n}}}$$

Donde:

\hat{t} = Valor de prueba.

\bar{X}_1 = Promedio del grupo 1, caudales registrados.



- \bar{X}_2 = Promedio del grupo 2, caudales generados.
- S_1 = Desviación tipo del grupo 1.
- s_2 = Desviación tipo del grupo 2.
- n = Grado de libertad – número de valores disminuido por 1.

Se compara el valor de \hat{t} con el valor límite $t_{p;n}$, que indica el límite superior que, con una probabilidad de error del P%, permite decir que ambos promedios pertenecen a la misma población.

Para comparar las desviaciones tipo se calcula el valor \hat{F} del test de Fisher.

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \text{ ó } \frac{s_2^2}{s_1^2} > 1$$

Y se le compara con el valor límite $F_{p/2(\%),(n1,n2)}$

3.5.5.15 Restricción del modelo

Según Lutz Scholz (1980), el modelo de precipitación esorrentía de Lutz Scholz presenta ciertas restricciones de uso y aplicación como son:

- La aplicación de los parámetros del modelo será de uso exclusivo y se aplicaran, únicamente dentro del rango de calibración establecido.
- El uso del modelo es únicamente para el cálculo de caudales mensuales.

3.5.6 Aplicación del modelo hidrológico de GR2M

El GR2M es un modelo que requiere para su uso, información promedio de variables climáticas para toda el área de drenaje hasta la estación Puente Ayaviri. Ante el número reducido de estaciones pluviométricas (8), se procedió a generar estaciones virtuales (13) y extraer datos de precipitación mensual del producto PISCO, se calcularon los valores promedio de precipitación para cada

mes y para toda la cuenca considerando el periodo de los años 1981-2016. Teniendo los datos de temperatura máxima y mínima obtenidas del producto PISCO, se estimó la variable evapotranspiración (ETP) utilizando el método de Hargreaves y Samani (1985), finalmente será necesario contar con la información de caudales observados de la estación Puente Ayaviri.

3.5.6.1 Cálculo de la evapotranspiración mensual

“Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), recomiendan que el método estándar para el cálculo de la ETP, es el modelo Penman-Monteith” (Citakoglu et al., 2014, p. 100). Sin embargo, las variables climáticas que requiere el modelo no se encuentran disponibles para las estaciones consideradas en la presente investigación, razón por el cual, se utilizó la fórmula de Hargreaves y Samani (1985) que solo requiere los datos de temperatura y radiación solar, cuya ecuación para su cálculo es:

$$ETP = 0.0023(T_m + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} * R_a$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/día).

T_m = Temperatura media (°C)

T_{max} = Temperatura máxima (°C)

T_{min} = Temperatura mínima (°C)

R_a = Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación diaria (mm/día).

Se obtiene de acuerdo a la latitud de la zona (tabla 20).

3.5.6.2 Radiación solar extraterrestre (Ra)

La Ra en mm/día, fue extraída de la tabla de Allen et al. (1998) (Original en MJ/m²·día¹; 1 mm/día = 2.45 MJ/m²·día¹) para el hemisferio sur.

Tabla 20

Radiación solar extraterrestre en mm/día

Latitud	Hemisferio Sur											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Nota. Adaptado de Allen et al. (1998).



3.5.6.3 Modelo hidrológico GR2M

Los datos de ingreso al modelo hidrológico GR2M, como la precipitación areal y evapotranspiración areal, deben ser en unidades de mm, por ello los caudales medios mensuales deberán ser convertidos a mm, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = 86.4 * Q * N / A$$

Donde:

C: Caudal mensual (mm)

Q: Caudal mensual (m^3/s)

N: Número de días del mes

A: Área de la cuenca (km^2)

Para el uso del modelo GR2M, se necesita los siguientes insumos como datos de entrada: precipitación areal en mm, evapotranspiración areal mm, área de la cuenca en km^2 y caudales observados en mm. Dentro del modelo se encuentran los parámetros a calibrar los cuales son: la función de producción (X_1) y la función de transferencia (X_2).

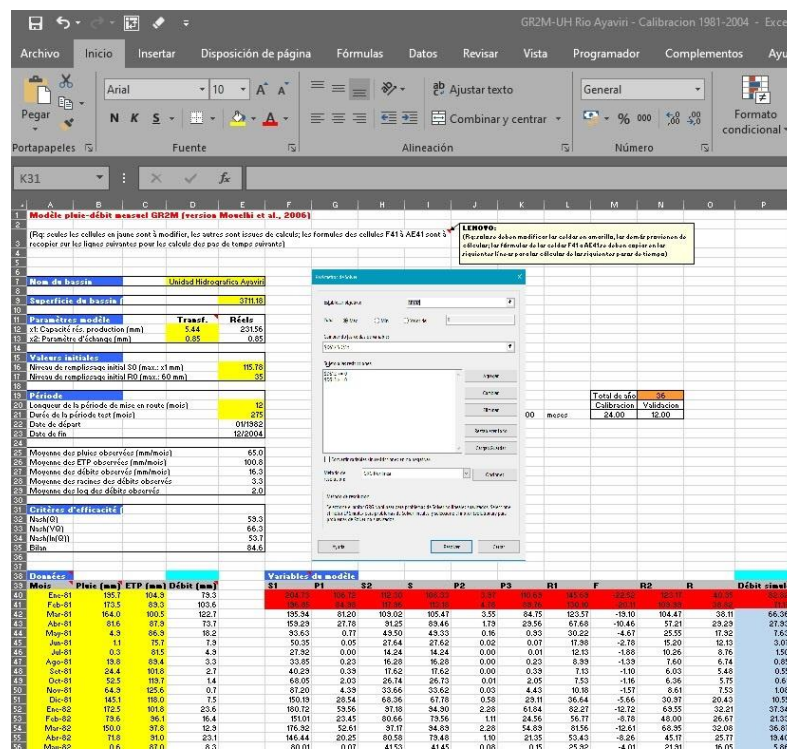
Los parámetros X_1 y X_2 , se calibraron por medio de un proceso de optimización SOLVER que se encuentra incorporado en el programa Excel, considerando como celda objetivo la eficiencia de Nash (E) para un valor máximo, intercambiando los parámetros X_1 y X_2 (sujeto a restricciones X_1 y $X_2 \geq 0$), el método de resolución fue el GRG No lineal (algoritmo de gradiente reducido generalizado), por motivo de que el comportamiento del caudal es no lineal, con ello se procede a obtener una mejor aproximación de los caudales simulados a los caudales observados.

Se requiere dividir las series de datos en dos etapas: etapa de calibración y validación, para la etapa de calibración se considera la serie de datos del periodo 1981-2004, que equivale a 2/3 de la información disponible, ya que es conveniente utilizar la mayor cantidad de datos con el fin de calibrar adecuadamente los parámetros X_1 y X_2 del modelo, cabe indicar que para el periodo de calentamiento del modelo fue necesario utilizar los datos del año 1981, con el propósito de aminorar las condiciones iniciales no conocidas.

Para la etapa de validación se considera la serie de datos del periodo 2005-2016, equivalente a 1/3 de la información total disponible.

Figura 34

Interfaz del modelo hidrológico GR2M



3.5.7 Aplicación del modelo hidrológico de abcd

Para la aplicación del modelo hidrológico abcd, se tomó en cuenta los siguientes pasos:

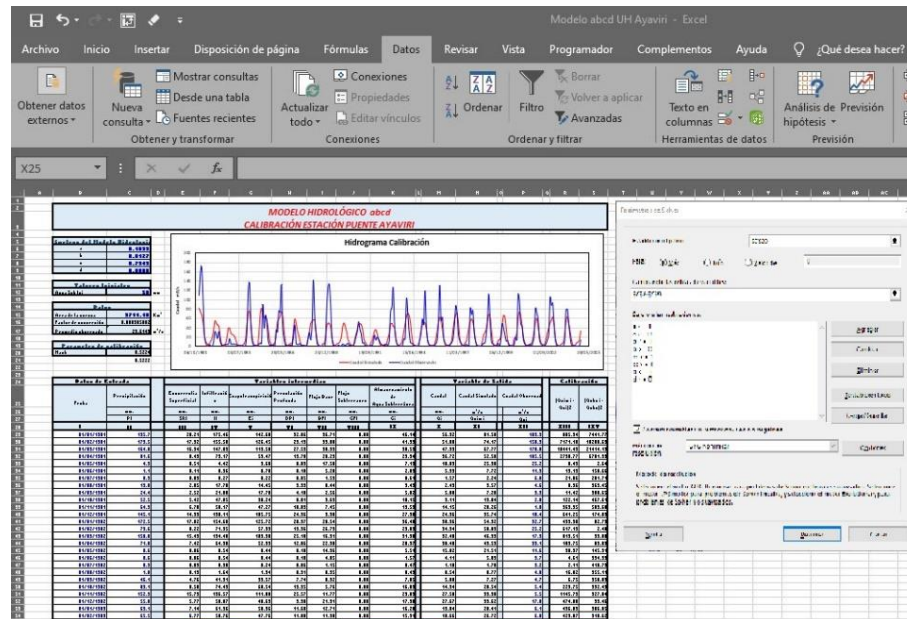


- Delimitación de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, con la ayuda del software ArcGIS, y determinar la superficie de aporte de la escorrentía hasta el punto de aforo (Puente Ayaviri), como también los principales parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.
- Luego, se determinó la precipitación media mensual de la unidad hidrográfica del río Ayaviri mediante el método del Polígonos de Thiessen, Distancia Inversa Ponderada (IDW) y Kriging, para luego tomar el promedio de los tres métodos como dato resultante de valores medios de la cuenca, calculado con el Software Hydraces.
- Se utilizó como datos de entrada los caudales medios mensuales observados de la estación hidrométrica puente Ayaviri periodo 1981-2016.
- Se definió el periodo de calibración con la disponibilidad de datos de precipitación y caudales mensuales; por lo que se adoptó el periodo de calibración desde 1981-2004, y para la validación del modelo el periodo de 2005 - 2016.
- Posteriormente, se estimaron los parámetros a, b, c y d, valores iniciales necesarios para iniciar los cálculos del proceso de calibración del modelo, así como el valor de almacenamiento inicial de agua subterránea, este se asumió de acuerdo a las características de la cuenca.
- Para la optimización de los parámetros a, b, c y d en el proceso de calibración, se utilizó la herramienta Solver que se encuentra incorporado en el programa Excel.
- Para el proceso de validación del modelo abcd, se consideró los parámetros a, b, c, y d obtenidos en la etapa de calibración.

- Finalmente con la obtención del modelo calibrado y validado, se obtuvieron la serie de caudales medios mensuales en el periodo de 1981-2016, de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

Figura 35

Interfaz del modelo hidrológico abcd



3.5.8 Determinación de la eficiencia del modelo hidrológico Lutz Scholz, GR2M y abcd

- Para la validación final de los modelos hidrológicos utilizados, se determinan las medidas de bondad de ajuste para las etapas de calibración y validación, obteniéndose con ello un indicativo de si los parámetros estimados con los modelos se aproximan bastante a la realidad o no.

- La eficiencia de cada modelo hidrológico, se determinó usando los índices estadísticos como son: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS), el coeficiente de



calibración (r), criterio de Schultz (D) y la razón RMSE, cuyas ecuaciones se describen en el ítem 2.9.

- Luego se confrontará los resultados de los índices estadísticos, para determinar cuál de los tres modelos: Lutz Scholz, GR2M y abcd es el que mejor representa el comportamiento del proceso lluvia-escorrentía en la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA

4.1.1 Análisis pluviométrico

4.1.1.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

Para el AED, se realizó el análisis de correlación de la información observada y la información obtenida del producto PISCOpm v.2.1, los resultados del análisis de correlación para las estaciones observadas y las estaciones virtuales se aprecian en la tabla 21, y los resultados de este análisis de regresión y el análisis gráfico por cada estación pluviométrica se puede observar en el Anexo C de la presente investigación.

Tabla 21

Resultados del análisis de correlación de la información pluviométrica

N°	Estación	R ²
1	Ayaviri	0.82
2	Chuquibambilla	0.94
3	La Raya	0.67
4	Llalli	0.97
5	Nuñoa	0.55
6	Orurillo	0.70
7	Quillisani	0.95
8	Santa Rosa	0.97

De la tabla anterior se puede destacar que la estación de Nuñoa es la que presenta un valor mínimo de 0.55 de correlación con la información observada,



esto debido a que la data PISCOpm v.2.1, sobreestima la precipitación mensual en algunos años de la serie.

Posteriormente se efectuó el análisis exploratorio de los datos pluviométricos correspondientes de las 21 estaciones, para ello las técnicas utilizadas para tal propósito fueron el análisis grafico histogramas y diagrama de caja o box plot.

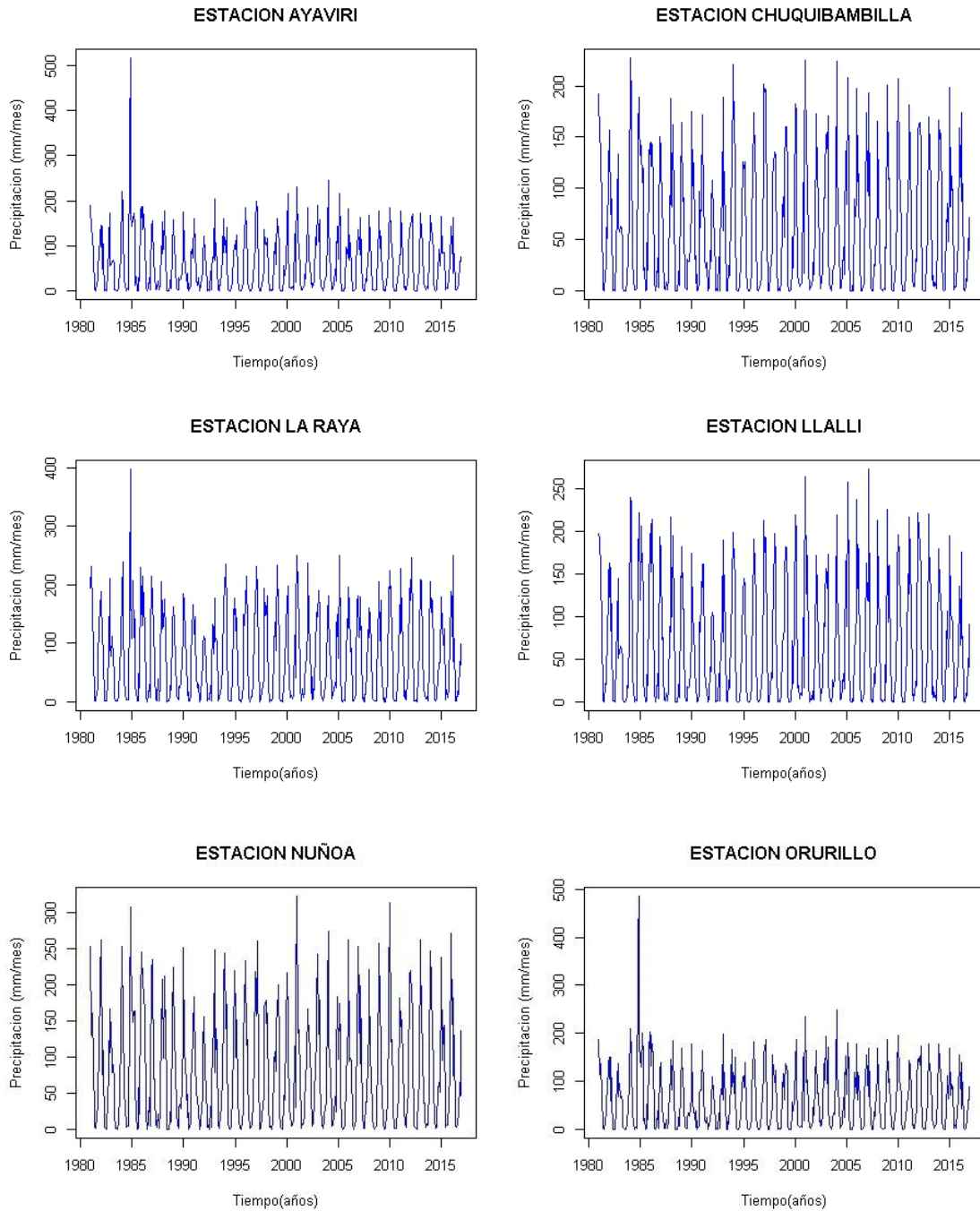
Análisis gráfico de histogramas

Se realizó el análisis visual de los histogramas, con el propósito de detectar y/o identificar en forma visual algunas inconsistencias en la información pluviométrica obtenida del producto PISCOpm v.2.1, así como también para ver la estacionalidad de la información.

En la figura 36, se visualizan los histogramas de los registros mensuales de la precipitación de las 21 estaciones utilizadas en la presente investigación, donde se observa algunos valores extremos y en su mayoría manifiestan la secuencia cíclica y estacional de la precipitación.

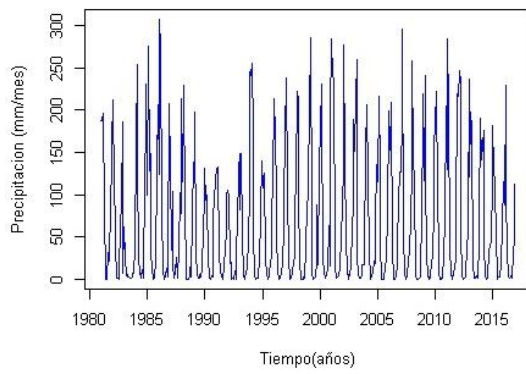
Figura 36

AED histogramas de precipitación mensual PISCOpm v.2.1 periodo 1981-2016

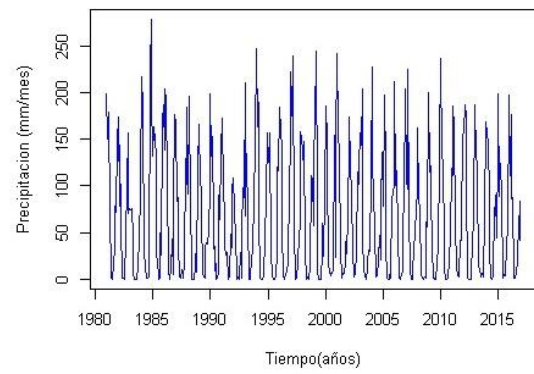




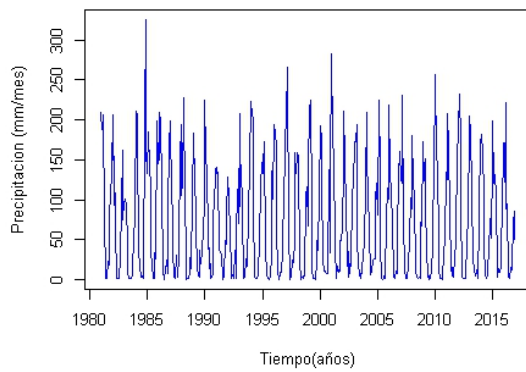
ESTACION QULLISANI



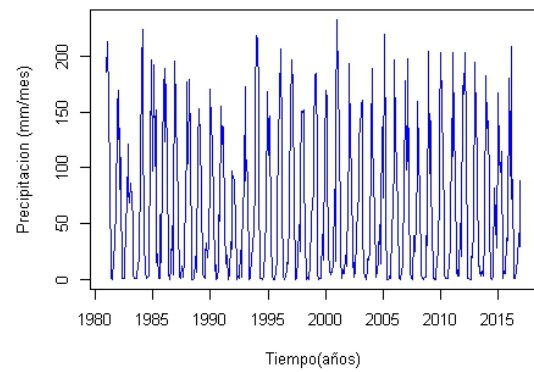
ESTACION SANTA ROSA



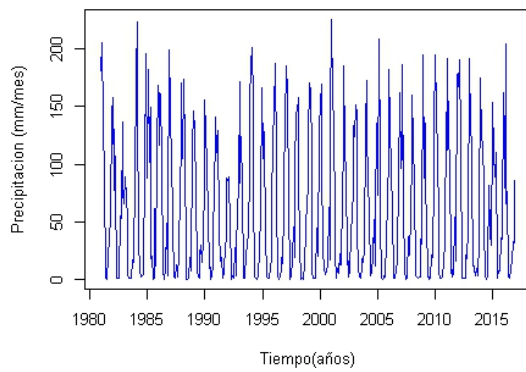
ESTACION A1



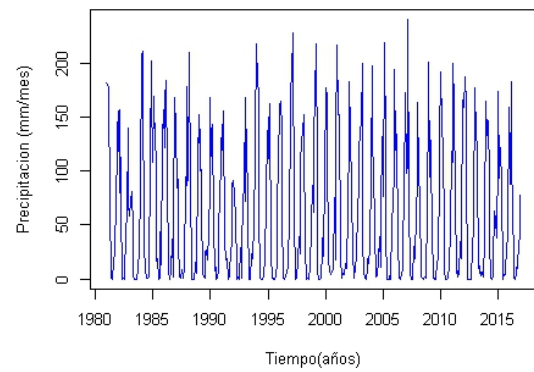
ESTACION A2



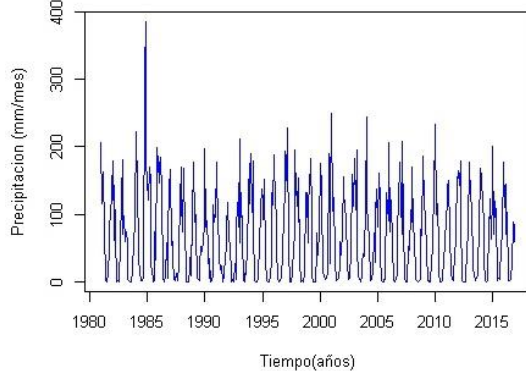
ESTACION A3



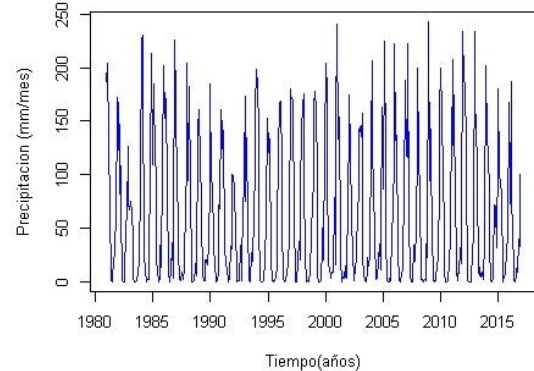
ESTACION A4



ESTACION A5

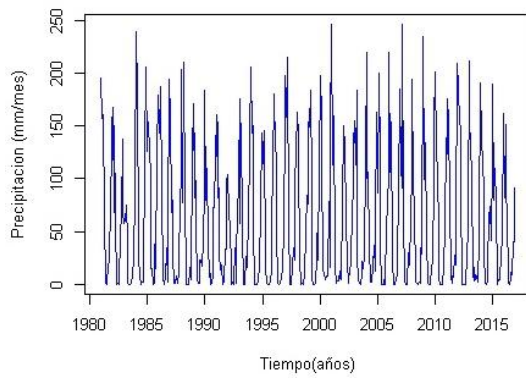


ESTACION A6

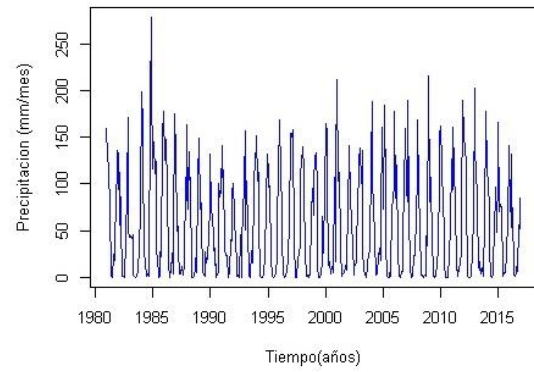




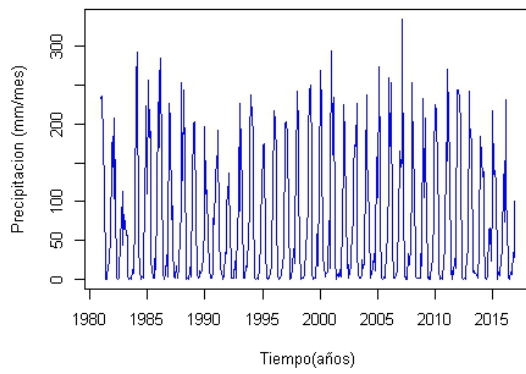
ESTACION A7



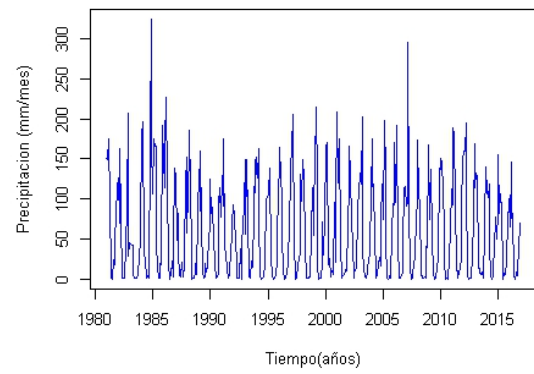
ESTACION A8



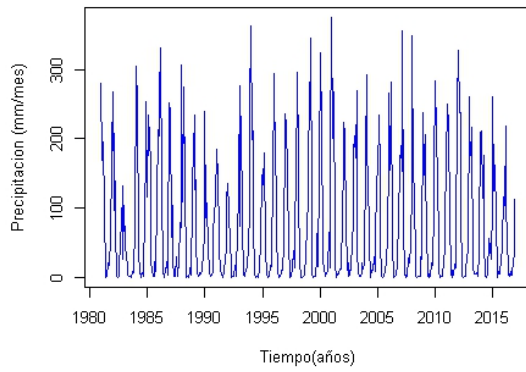
ESTACION A9



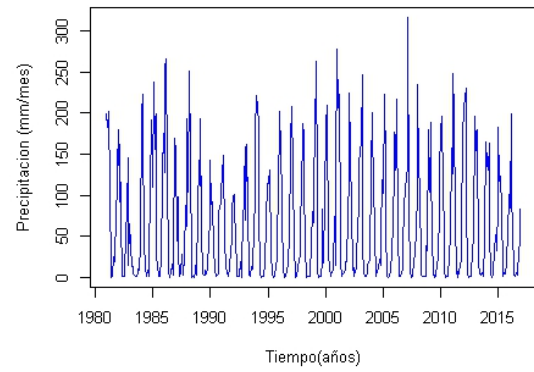
ESTACION A10



ESTACION A11



ESTACION A12



ESTACION A13

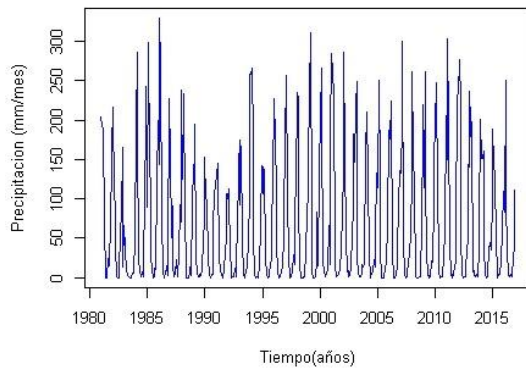
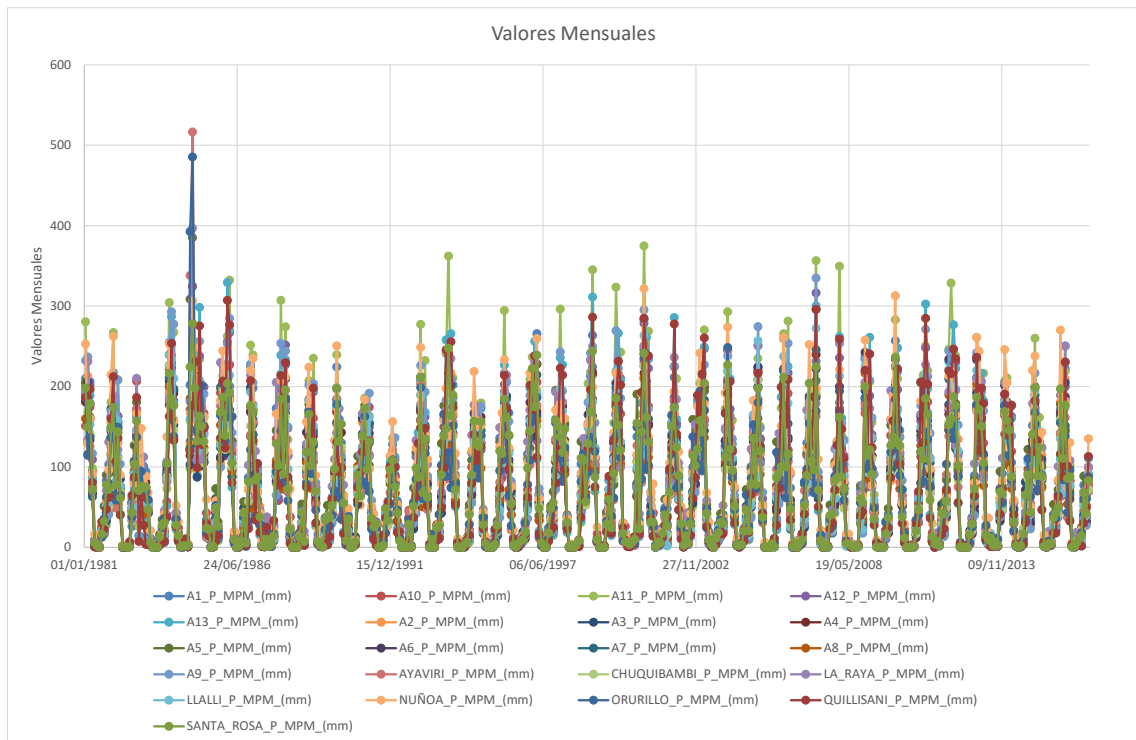


Figura 37

AED histogramas de precipitación mensual PISCOpm v.2.1 Multi-estaciones periodo 1981-2016



Del análisis de los histogramas, realizadas a las 21 estaciones pluviométricas entre existentes y virtuales utilizadas en la presente investigación, se concluye que para el periodo analizado 1981-2016, no existen algún periodo dudoso significativo, es decir los datos se muestran en forma uniforme, sin embargo, se ha podido detectar algunos datos extremos tal es el caso de la estación de Ayaviri que se registra en el mes de octubre y noviembre de 1984, así mismo la estación de La Raya que registra en el mes de noviembre de 1984 y finalmente la estación de Orurillo que registra en el mes de octubre y noviembre de 1984.

Diagramas de caja o box plot

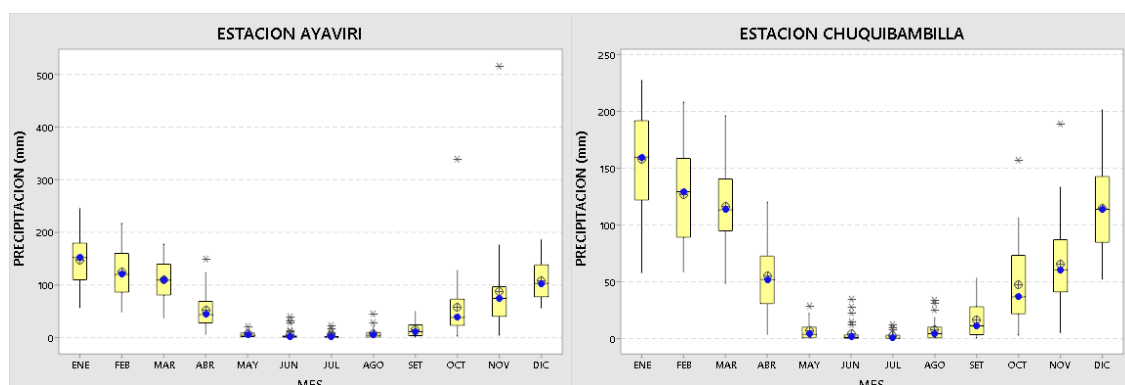
La figura 38 se muestran los diagramas de cajas de la variable precipitación total mensual del periodo 1981-2016, para las 21 estaciones analizadas en este

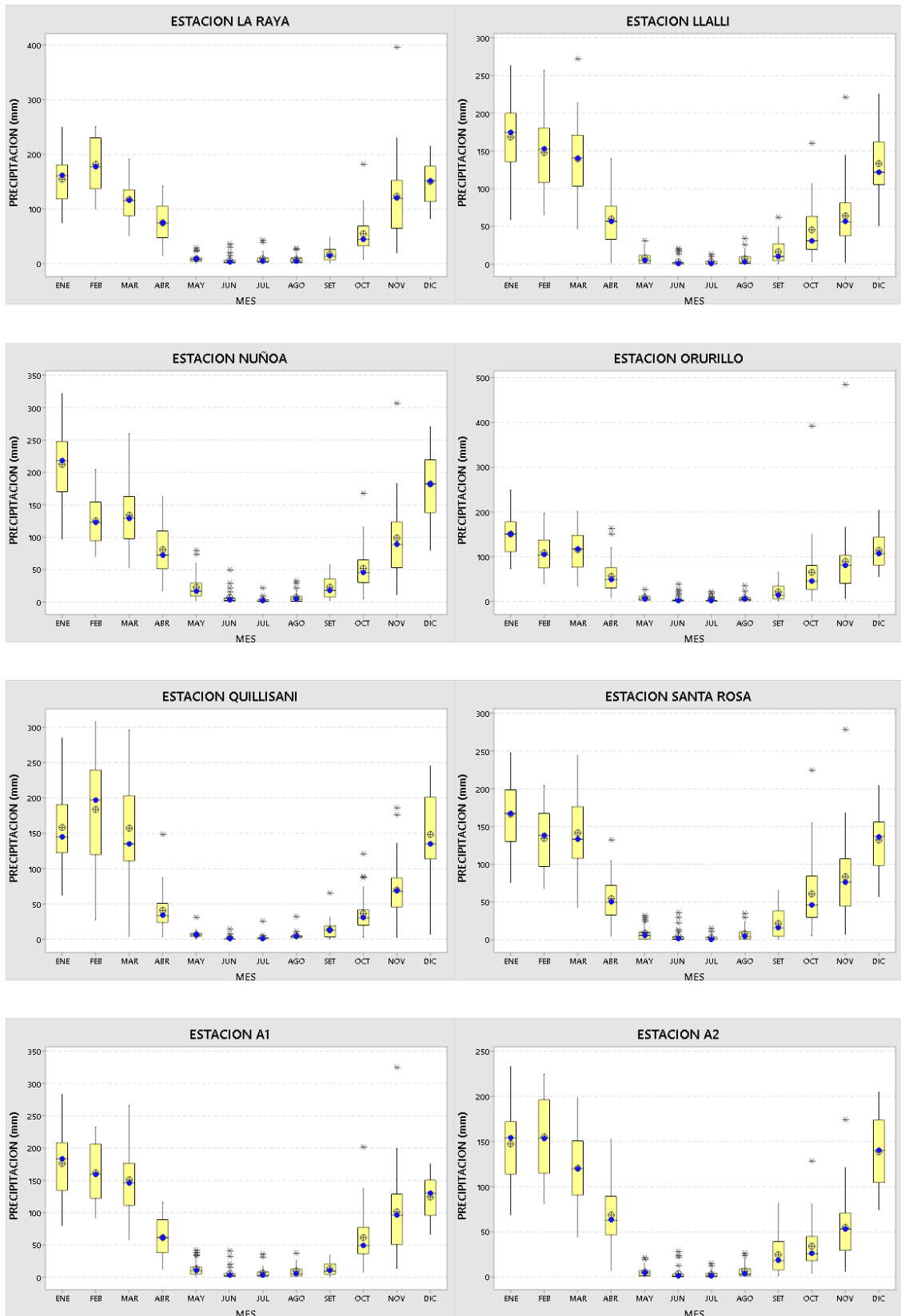
estudio, se observa el comportamiento estacional de la precipitación, destacándose que el periodo húmedo comienza entre los meses de noviembre y diciembre y se amplía hasta el mes de marzo, mientras que el periodo seco comienza en el mes de mayo hasta el mes de setiembre; además se ha podido identificar algunos meses de transición donde existe menos precipitación durante el año, estos son los meses de Octubre (comienzo del periodo húmedo) y el mes de Abril (fin del periodo húmedo).

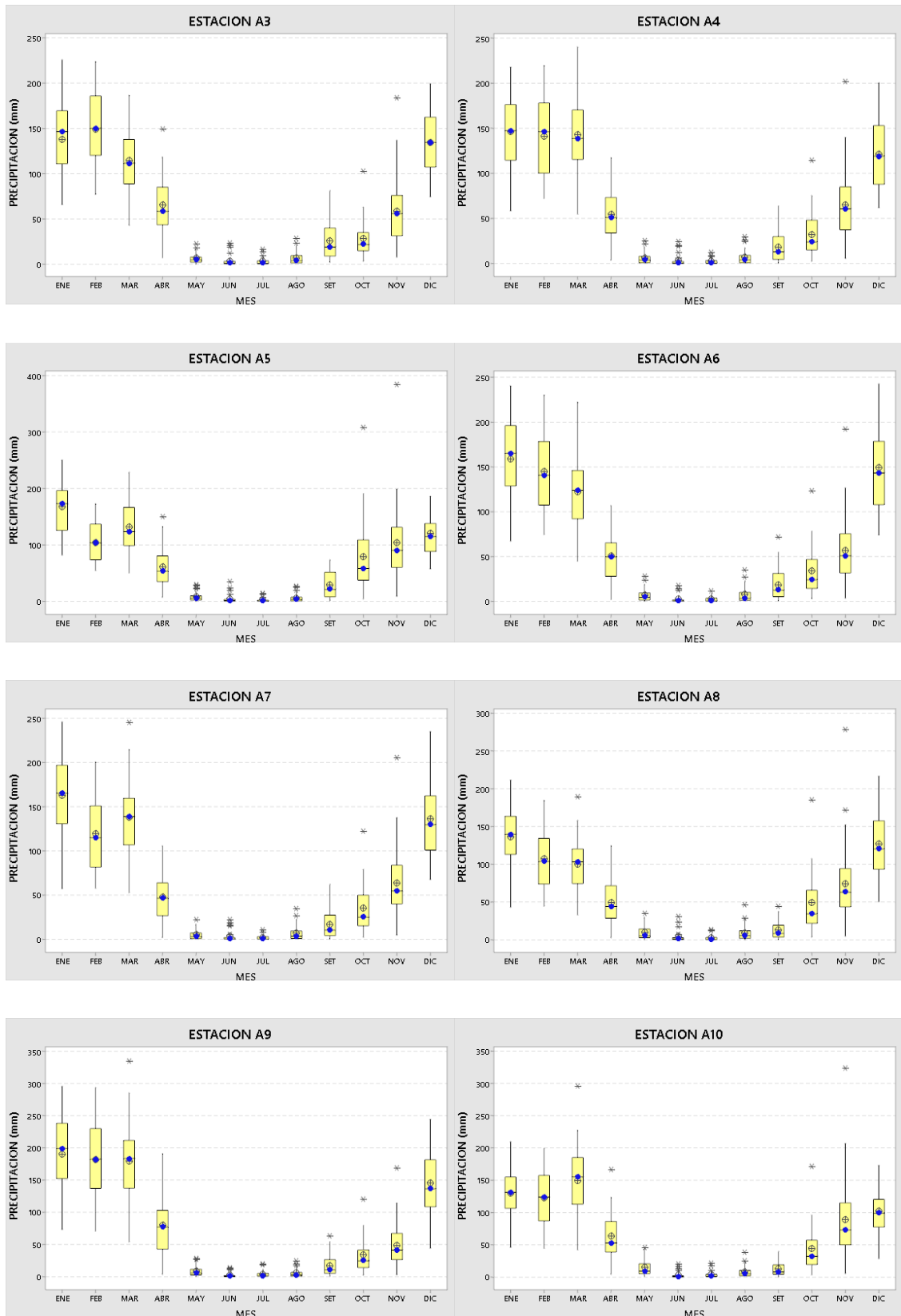
Las líneas intermedias de cada diagrama de caja simbolizan las medianas de los datos, y las líneas que se amplían hacia los extremos son los valores máximos y mínimos, también se puede observar algunos valores extremos que se encuentran simbolizados por un “*”, así mismo se puede visualizar que los valores del periodo húmedo tienden a agruparse en una distribución con sesgo positivo, con respecto a los valores del periodo seco no muestran una clara distribución, debido que la precipitación en esos meses es mínima y en algunos casos es nula.

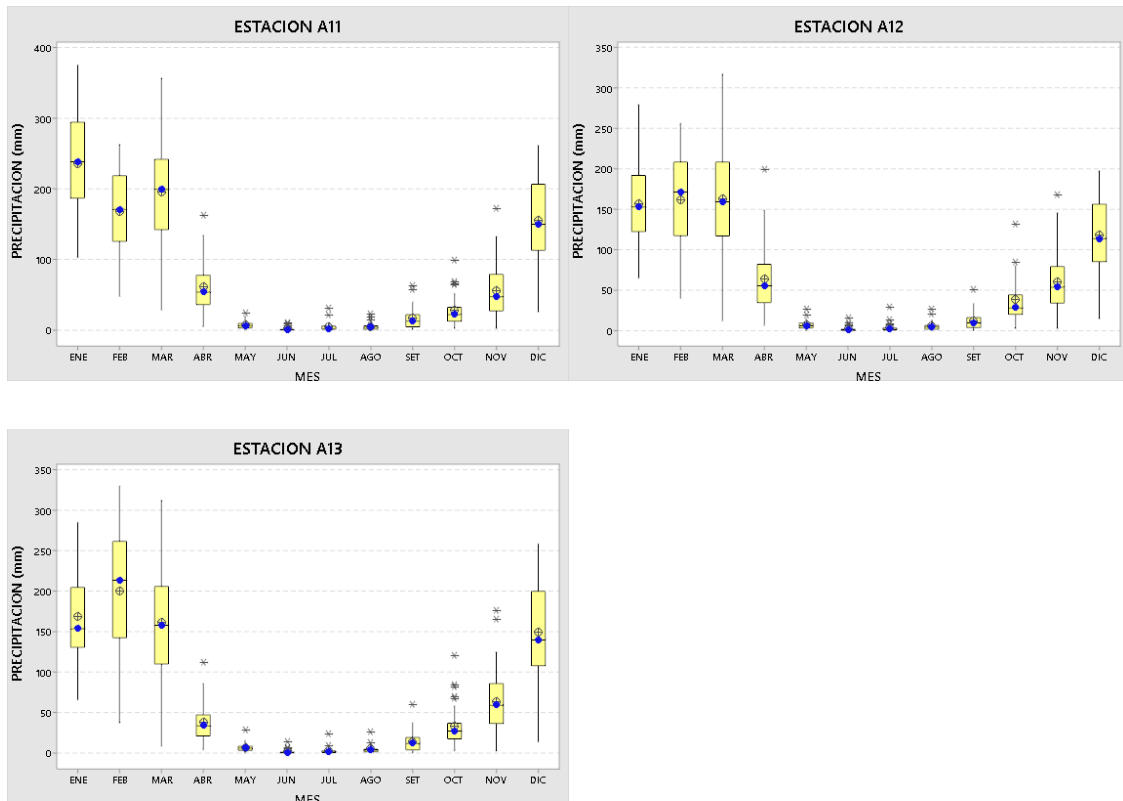
Figura 38

Diagrama de cajas (box plot) de la serie mensual de precipitaciones Periodo: 1981 – 2016









En resumen, de acuerdo a la apreciación visual de los histogramas de la serie mensual, y el gráfico de cajas de la variable precipitación, los valores atípicos detectados serán analizados, mediante la homogeneidad y se analizarán estadísticamente si son significativos.

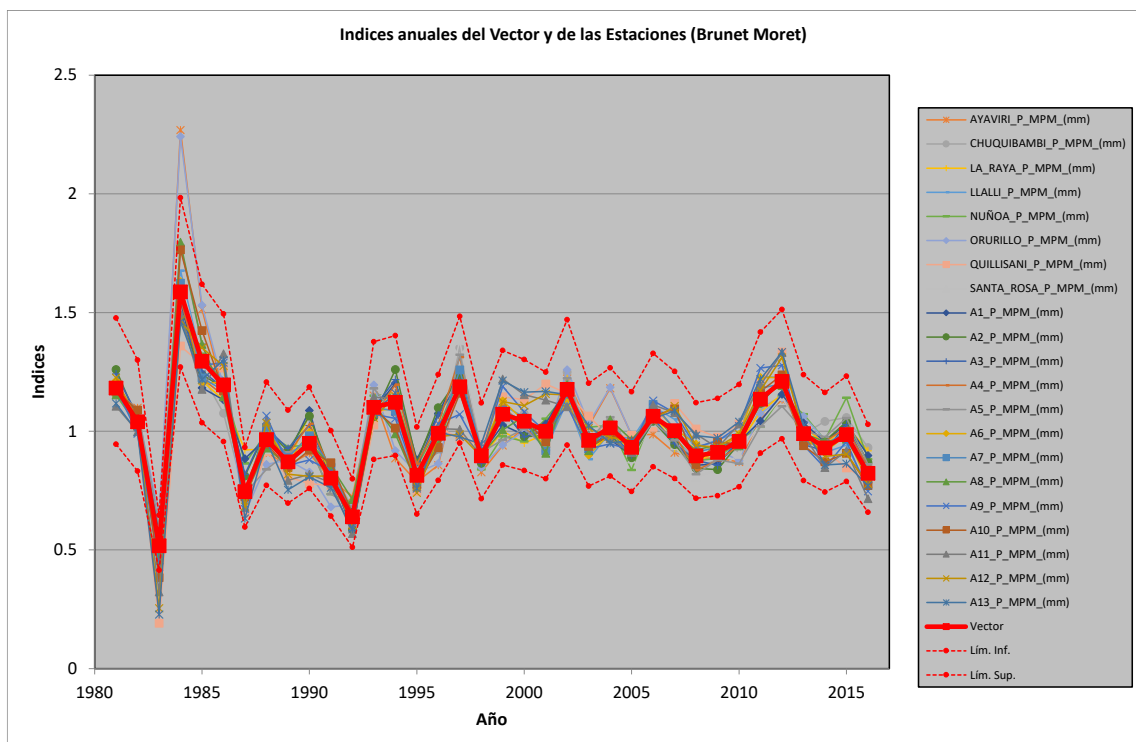
4.1.1.2 Análisis de la homogeneidad de series de datos

Para el análisis de consistencia de la información pluviométrica, se utilizó la metodología del Vector Regional (MVR), para la crítica de la información y así tener una data homogénea y consistente. La figura 39 muestra el gráfico índices anuales del vector regional y de las 21 estaciones que se consideraron para el periodo comprendido entre los años 1981-2016, donde la línea roja continua representa el Vector Regional, mientras que las líneas rojas punteadas representan los límites aceptables según el método de Brunet Moret, y las líneas de otros colores son los índices de cada estación, donde nos muestra el comportamiento de

los datos de las diferentes estaciones varían en el mismo sentido y en proporciones casi idénticas que el Vector Regional, por lo que se trata de una zona de un mismo comportamiento climático o que presentan el mismo régimen de precipitaciones, por lo que podemos afirmar la homogeneidad pluviométrica de las estaciones.

Figura 39

Vector regional de la unidad hidrográfica del río Ayaviri



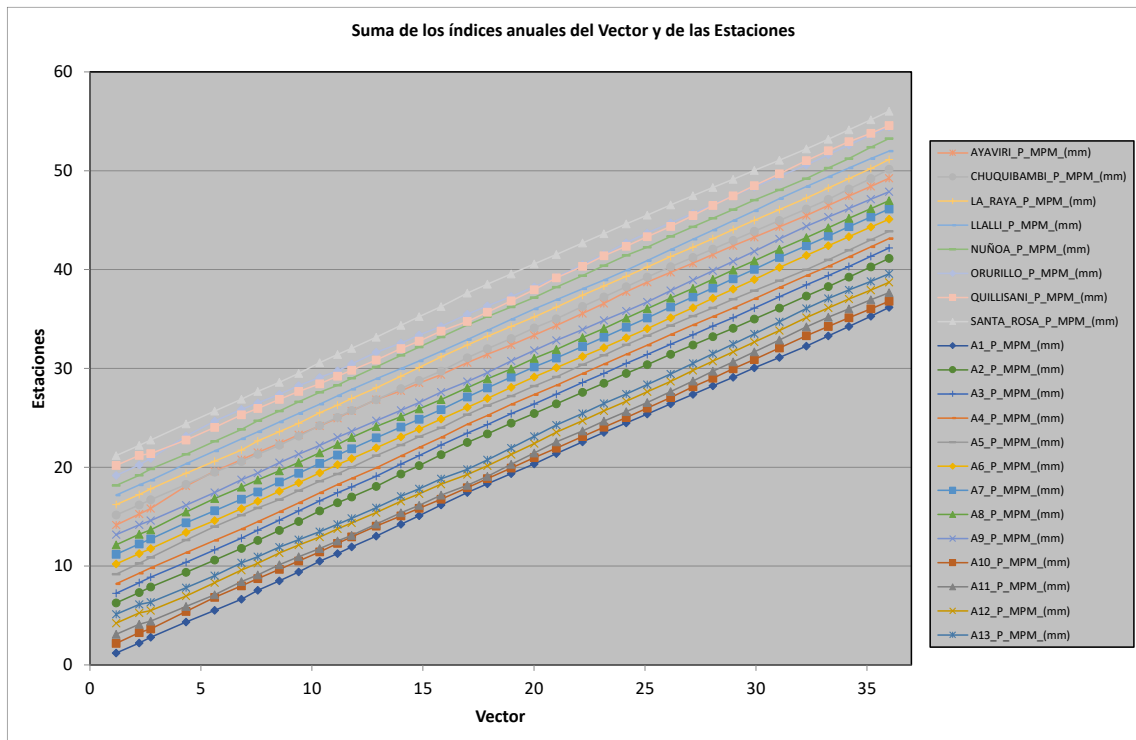
Los parámetros más significativos para evaluar la calidad de los datos que presenta cada estación meteorológica son: La Desviación Estándar de los Desvíos (D.E.D.), este indicador compara las desviaciones estándar entre los índices de las estaciones y las del Vector Regional, valores altos indican posiblemente una mala calidad de datos de la estación, de lo contrario podría encontrarse en el margen de una zona climática.

En la figura 40, se muestra los valores de índices acumuladas de las 21 estaciones pluviométricas, el cual muestra que los datos son consistentes y que no

registran quiebres o que no existen cambios en la pendiente de los datos, para el período 1981-2016.

Figura 40

Gráfico de acumuladas de las estaciones de estudio con respecto al Vector



Para la presente investigación se ha determinado que las estaciones pluviométricas consideradas corresponden a una misma zona climática, puesto que los índices de las estaciones tienen un comportamiento similar a la del vector regional para el período de análisis de los años 1981-2016, según ello podemos afirmar la homogeneidad de la información pluviométrica proporcionada por el producto PISCOpm v.2.1. Los parámetros estadísticos que respaldan tal información se muestran en la tabla 22. La correlación entre los índices del Vector Regional y las estaciones pluviométricas (Correl./Vector), son mayores a 0.881, lo que indica una alta proporcionalidad entre ambas variables, asimismo la desviación estándar de los desvíos (DED) son menores o igual a 0.141.

Tabla 22*Coefficientes de correlación con respecto al Vector Regional*

N°	Id Estación	No Años	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
1	Ayaviri_P_MPM_(mm)	36	715.3	710.3	0.140	0.884
2	Chuquibambi_P_MPM_(mm)	36	716.8	714.0	0.060	0.948
3	La_Raya_P_MPM_(mm)	36	894.7	891.3	0.059	0.950
4	Llalli_P_MPM_(mm)	36	790.4	790.7	0.045	0.977
5	Nuñoa_P_MPM_(mm)	36	941.6	934.7	0.066	0.938
6	Orurillo_P_MPM_(mm)	36	730.7	721.7	0.141	0.887
7	Quillisani_P_MPM_(mm)	36	818.7	828.3	0.108	0.881
8	Santa_Rosa_P_MPM_(mm)	36	812.7	812.3	0.059	0.954
9	A1_P_MPM_(mm)	36	880.6	876.4	0.059	0.951
10	A2_P_MPM_(mm)	36	760.3	757.3	0.057	0.953
11	A3_P_MPM_(mm)	36	731.4	727.7	0.045	0.971
12	A4_P_MPM_(mm)	36	736.3	733.3	0.042	0.975
13	A5_P_MPM_(mm)	36	809.7	812.3	0.072	0.940
14	A6_P_MPM_(mm)	36	751.3	749.3	0.037	0.982
15	A7_P_MPM_(mm)	36	734.2	731.6	0.032	0.986
16	A8_P_MPM_(mm)	36	676.4	677.0	0.055	0.969
17	A9_P_MPM_(mm)	36	891.9	894.8	0.064	0.955
18	A10_P_MPM_(mm)	36	736.0	740.2	0.059	0.974
19	A11_P_MPM_(mm)	36	929.4	938.1	0.089	0.919
20	A12_P_MPM_(mm)	36	786.3	792.7	0.083	0.933
21	A13_P_MPM_(mm)	36	837.2	847.3	0.101	0.904

4.1.1.3 Análisis de saltos y tendencias

4.1.1.3.1 Análisis de saltos

Se efectuó al análisis estadístico de saltos de la información pluviométrica, en los parámetros como la media y la desviación estándar.

El análisis de saltos se ha realizado mediante la prueba estadística de Cusum y para la diferencia de medias la prueba de Rank Sum, empleando el Software TREND. Si los parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar de los períodos considerados en el análisis son estadísticamente iguales, entonces no se corrigen los datos.

De acuerdo los resultados del análisis efectuado, se obtiene que la serie mensual de precipitaciones de las estaciones consideradas, no muestran “Saltos” significativos al 95% de probabilidad de confianza, como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23

Estadísticos de la prueba Cusum a la serie mensual de precipitaciones

N°	Estación	Test statistic - calculated	Critical values - (Statistical table)			Significancia
			a=0.1	a=0.05	a=0.01	
1	Ayaviri	8	25.357	28.267	33.879	NS
2	Chuquibambilla	9	25.357	28.267	33.879	NS
3	La Raya	10	25.357	28.267	33.879	NS
4	Llalli	10	25.357	28.267	33.879	NS
5	Nuñoa	12	25.357	28.267	33.879	NS
6	Orurillo	13	25.357	28.267	33.879	NS
7	Quillisani	12	25.357	28.267	33.879	NS
8	Santa Rosa	10	25.357	28.267	33.879	NS
9	A1	7	25.357	28.267	33.879	NS
10	A2	12	25.357	28.267	33.879	NS
11	A3	10	25.357	28.267	33.879	NS
12	A4	11	25.357	28.267	33.879	NS
13	A5	11	25.357	28.267	33.879	NS
14	A6	10	25.357	28.267	33.879	NS
15	A7	11	25.357	28.267	33.879	NS
16	A8	10	25.357	28.267	33.879	NS
17	A9	10	25.357	28.267	33.879	NS
18	A10	7	25.357	28.267	33.879	NS
19	A11	6	25.357	28.267	33.879	NS
20	A12	8	25.357	28.267	33.879	NS
21	A13	14	25.357	28.267	33.879	NS

Tabla 24*Estadísticos de la prueba Rank Sum a la serie mensual de precipitaciones*

N°	Estación	Test statistic - calculated	Critical values - (Statistical table)			Significancia
			a=0.1	a=0.05	a=0.01	
1	Ayaviri	-0.343	1.645	1.96	2.576	NS
2	Chuquibambilla	-0.44	1.645	1.96	2.576	NS
3	La Raya	-0.205	1.645	1.96	2.576	NS
4	Llalli	-0.366	1.645	1.96	2.576	NS
5	Nuñoa	-0.248	1.645	1.96	2.576	NS
6	Orurillo	-0.722	1.645	1.96	2.576	NS
7	Quillisani	-1.035	1.645	1.96	2.576	NS
8	Santa Rosa	0.138	1.645	1.96	2.576	NS
9	A1	-0.168	1.645	1.96	2.576	NS
10	A2	-0.038	1.645	1.96	2.576	NS
11	A3	-0.078	1.645	1.96	2.576	NS
12	A4	-0.202	1.645	1.96	2.576	NS
13	A5	-0.246	1.645	1.96	2.576	NS
14	A6	-0.312	1.645	1.96	2.576	NS
15	A7	-0.399	1.645	1.96	2.576	NS
16	A8	-0.289	1.645	1.96	2.576	NS
17	A9	-0.429	1.645	1.96	2.576	NS
18	A10	-0.316	1.645	1.96	2.576	NS
19	A11	-0.706	1.645	1.96	2.576	NS
20	A12	-0.723	1.645	1.96	2.576	NS
21	A13	-0.935	1.645	1.96	2.576	NS

4.1.1.3.2 Análisis de tendencias (estacionariedad)

Se procedió a evaluar las tendencias para tal fin se usó la prueba estadística de Mann-Kendall, empleando para dicho cálculo el software TREND, donde se obtuvo como resultado que la serie mensual de precipitaciones, no muestran “tendencias” significativas al 95% de probabilidad de confianza, por lo que son series estacionarias y libres de tendencia, como se muestra en la tabla 25.

En resumen, luego de haber evaluado la consistencia de la información hidrométrica del río Ayaviri, la serie mensual de caudales medios mensuales es

libre de saltos y tendencias, es decir es una serie consistente, homogénea, estacionaria y confiable al 95% de probabilidad de confianza.

En resumen, después de haber evaluado la consistencia de la información pluviométrica, la serie mensual de precipitaciones consideradas en la presente tesis, es libre de saltos y tendencias, es una serie homogénea, consistente y confiable al 95% de probabilidad de confianza.

Tabla 25

Estadísticos de la prueba Mann Kendall a la serie mensual de precipitaciones

N°	Estación	Test statistic - calculated	Critical values - (Statistical table)			Significancia
			a=0.1	a=0.05	a=0.01	
1	Ayaviri	-0.263	1.645	1.96	2.576	NS
2	Chuquibambilla	-0.114	1.645	1.96	2.576	NS
3	La Raya	-0.076	1.645	1.96	2.576	NS
4	Llalli	-0.206	1.645	1.96	2.576	NS
5	Nuñoa	-0.127	1.645	1.96	2.576	NS
6	Orurillo	0.031	1.645	1.96	2.576	NS
7	Quillisani	0.535	1.645	1.96	2.576	NS
8	Santa Rosa	-0.534	1.645	1.96	2.576	NS
9	A1	-0.166	1.645	1.96	2.576	NS
10	A2	-0.37	1.645	1.96	2.576	NS
11	A3	-0.406	1.645	1.96	2.576	NS
12	A4	-0.333	1.645	1.96	2.576	NS
13	A5	-0.236	1.645	1.96	2.576	NS
14	A6	-0.258	1.645	1.96	2.576	NS
15	A7	-0.161	1.645	1.96	2.576	NS
16	A8	-0.24	1.645	1.96	2.576	NS
17	A9	-0.139	1.645	1.96	2.576	NS
18	A10	-0.304	1.645	1.96	2.576	NS
19	A11	0.187	1.645	1.96	2.576	NS
20	A12	0.15	1.645	1.96	2.576	NS
21	A13	0.468	1.645	1.96	2.576	NS



4.1.2 Análisis de temperatura

Se utilizaron la ubicación de 21 estaciones que se encuentran dentro y las más cercanas a la unidad hidrográfica del río Ayaviri, de los cuales se pudo obtener las temperaturas máximas y mínimas mensuales desde 1981 hasta el año 2016, datos extraídos del producto PISCOt v.1.1, las estaciones consideradas corresponden a Ayaviri, Chuquibambilla, La Raya, Llalli, Nuñoa, Orurillo, Quillisani y Santa Rosa, así como estaciones virtuales o ficticias codificadas como: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13.

Los histogramas de la variable temperatura máxima y mínima se presentan en el anexo E y F de este trabajo de investigación.

La tabla 26 confirma que las temperaturas máximas más altas del año se registran en octubre y noviembre, las cuales son comunes en todas las estaciones.

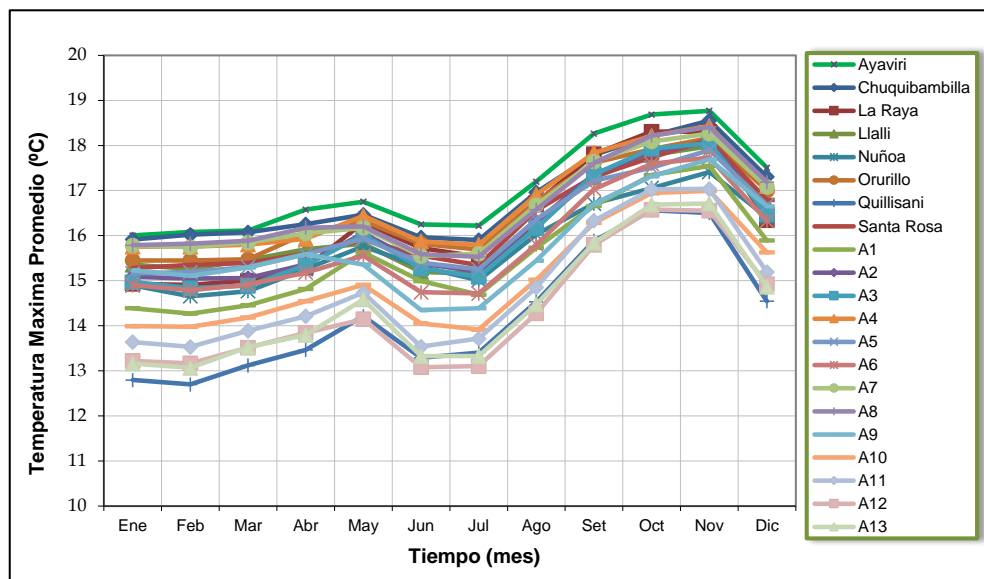
Tabla 26

Temperatura máxima (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri

N°	Estación	Altitud (msnm)	Mes												Prom Anual
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1	Ayaviri	3928	16.0	16.1	16.1	16.6	16.8	16.2	16.2	17.2	18.3	18.7	18.8	17.5	17.0
2	Chuquibambilla	3971	15.9	16.0	16.1	16.3	16.5	16.0	15.9	17.0	17.8	18.2	18.6	17.3	16.8
3	La Raya	4120	14.9	14.9	15.0	15.3	16.3	15.7	15.5	16.7	17.8	18.3	18.3	16.3	16.3
4	Llalli	3980	15.4	15.3	15.5	15.7	15.8	15.2	15.2	16.2	17.3	17.8	18.0	16.7	16.2
5	Nuñoa	4135	14.9	14.7	14.8	15.3	15.8	15.3	15.0	16.0	16.7	17.1	17.4	16.4	15.8
6	Orurillo	3920	15.4	15.4	15.5	16.0	16.3	15.8	15.7	16.8	17.6	17.9	18.2	17.0	16.5
7	Quillisani	4600	12.8	12.7	13.1	13.5	14.2	13.3	13.4	14.5	15.9	16.6	16.5	14.5	14.3
8	Santa Rosa	3966	15.3	15.4	15.4	15.6	15.9	15.6	15.3	16.6	17.3	17.7	18.1	16.8	16.2
9	A1	4908	14.4	14.3	14.5	14.8	15.6	15.0	14.7	15.7	16.7	17.3	17.5	15.9	15.5
10	A2	4720	15.1	15.0	15.1	15.4	16.1	15.4	15.2	16.3	17.4	17.9	18.1	16.6	16.1
11	A3	4173	15.0	14.8	14.9	15.3	16.0	15.3	15.1	16.2	17.4	17.9	18.1	16.5	16.0
12	A4	4006	15.8	15.8	15.8	15.9	16.4	15.9	15.8	16.9	17.8	18.2	18.4	17.1	16.7
13	A5	4395	15.2	15.2	15.3	15.6	15.9	15.4	15.3	16.4	17.2	17.5	17.9	16.7	16.1
14	A6	4774	14.9	14.8	14.9	15.2	15.6	14.7	14.7	15.8	17.0	17.6	17.7	16.3	15.8
15	A7	3975	15.8	15.7	15.8	16.0	16.2	15.5	15.6	16.7	17.6	18.1	18.3	17.1	16.5
16	A8	4151	15.8	15.8	15.9	16.2	16.2	15.6	15.5	16.6	17.6	18.2	18.4	17.2	16.6
17	A9	4406	15.2	15.1	15.3	15.6	15.4	14.4	14.4	15.4	16.7	17.3	17.7	16.7	15.8
18	A10	4903	14.0	14.0	14.2	14.5	14.9	14.1	13.9	15.0	16.3	16.9	17.0	15.6	15.0
19	A11	4621	13.6	13.5	13.9	14.2	14.7	13.5	13.7	14.9	16.3	17.0	17.0	15.2	14.8
20	A12	4971	13.2	13.2	13.5	13.8	14.1	13.1	13.1	14.3	15.8	16.6	16.6	14.9	14.4
21	A13	4761	13.2	13.1	13.5	13.8	14.6	13.3	13.3	14.5	15.8	16.7	16.7	14.9	14.4

Figura 41

Variación mensual de temperatura máxima – Promedio multianual



El periodo de mayor friaje dentro de la zona de estudio se presenta durante los meses de junio a agosto, y en el mes de julio se registra las temperaturas más bajas.

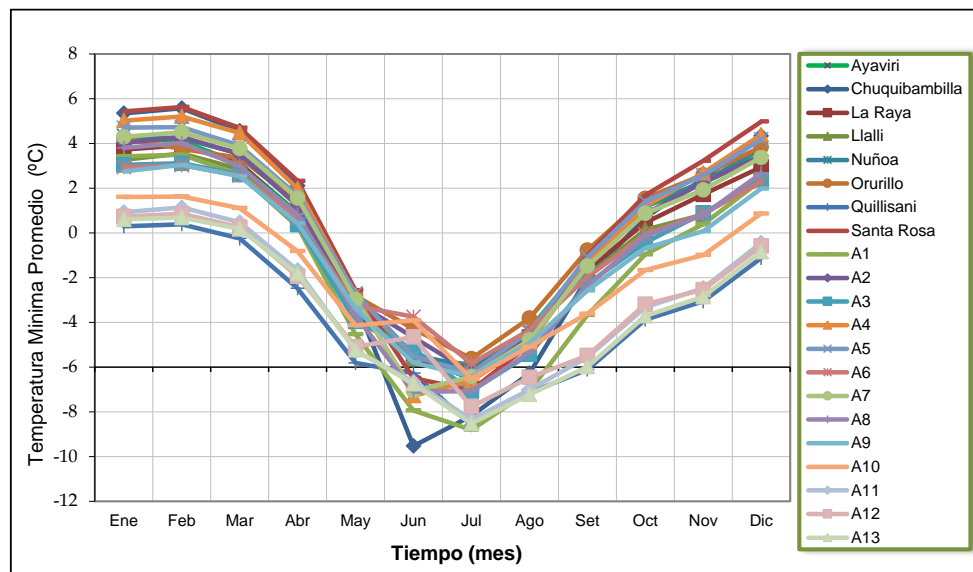
Tabla 27

Temperatura mínima (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri

N°	Estación	Altitud (msnm)	Mes											Prom Anual	
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov		Dic
1	Ayaviri	3928	4.2	4.1	3.1	0.9	-3.5	-5.6	-6.2	-4.3	-1.2	1.2	2.2	3.5	-0.1
2	Chuquibambilla	3971	5.3	5.6	4.6	2.1	-3.1	-9.5	-8.2	-6.3	-2.0	0.7	2.4	4.3	-0.3
3	La Raya	4120	3.7	3.9	3.1	0.8	-3.4	-5.6	-6.5	-4.7	-1.6	0.5	1.7	2.9	-0.4
4	Llalli	3980	3.3	3.6	2.8	0.8	-3.2	-5.6	-5.9	-4.4	-1.9	0.1	0.8	2.5	-0.6
5	Nuñoa	4135	4.3	4.2	3.6	1.4	-2.7	-5.5	-6.0	-4.4	-1.3	1.3	2.3	3.8	0.1
6	Orurillo	3920	4.2	3.8	3.4	1.4	-2.8	-4.3	-5.6	-3.8	-0.8	1.5	2.6	3.8	0.3
7	Quillisani	4600	0.3	0.4	-0.2	-2.5	-5.8	-6.3	-8.6	-7.1	-6.1	-3.9	-3.1	-1.1	-3.7
8	Santa Rosa	3966	5.4	5.6	4.7	2.3	-2.6	-6.5	-7.0	-5.0	-1.0	1.7	3.2	5.0	0.5
9	A1	4908	3.4	3.5	2.6	0.3	-4.5	-7.9	-8.8	-7.1	-3.7	-1.0	0.4	2.3	-1.7
10	A2	4720	4.0	4.3	3.5	1.2	-3.1	-4.7	-6.2	-4.5	-1.3	0.8	2.3	3.4	0.0
11	A3	4173	3.0	3.1	2.6	0.4	-4.0	-5.2	-7.1	-5.4	-2.3	-0.4	0.9	2.4	-1.0
12	A4	4006	5.0	5.2	4.5	2.0	-2.8	-7.3	-6.6	-4.9	-1.4	1.2	2.7	4.4	0.2
13	A5	4395	4.7	4.7	3.9	1.7	-2.7	-5.5	-6.3	-4.4	-1.1	1.4	2.6	4.2	0.3
14	A6	4774	2.9	3.0	2.6	0.7	-3.3	-3.8	-5.8	-4.3	-2.0	-0.1	0.9	2.3	-0.6
15	A7	3975	4.3	4.5	3.8	1.6	-3.0	-7.1	-6.4	-4.8	-1.5	0.9	1.9	3.4	-0.2
16	A8	4151	3.8	4.0	3.0	0.8	-3.7	-7.1	-7.1	-5.3	-2.4	-0.1	0.8	2.7	-0.9
17	A9	4406	2.8	3.0	2.5	0.4	-3.4	-5.8	-6.4	-4.9	-2.6	-0.7	0.1	2.0	-1.1
18	A10	4903	1.6	1.6	1.1	-0.8	-4.1	-3.9	-6.5	-5.1	-3.6	-1.7	-1.0	0.9	-1.8
19	A11	4621	0.9	1.1	0.5	-1.7	-5.3	-6.7	-8.3	-7.0	-5.6	-3.3	-2.5	-0.4	-3.2
20	A12	4971	0.7	0.9	0.3	-1.9	-5.1	-4.7	-7.8	-6.5	-5.5	-3.2	-2.5	-0.6	-3.0
21	A13	4761	0.6	0.7	0.2	-1.8	-5.2	-6.8	-8.5	-7.2	-6.0	-3.7	-2.9	-0.8	-3.5

Figura 42

Variación mensual de temperatura mínima – Promedio multianual



4.1.3 Análisis hidrométrico

4.1.3.1 Análisis exploratorio de datos (AED)

Se realizó el análisis exploratorio de los datos hidrométricos que presenta la estación Puente Ayaviri, a través del análisis visual de histogramas y diagrama de cajas para detectar posibles datos atípicos en la serie histórica, que se obtuvo del “estudio hidrológico de la unidad hidrográfica del río Ramis” (ANA, 2019); en las figura 43 y 44 se observan los histogramas de los caudales observados a paso mensual y anual desde el periodo enero de 1981 a diciembre de 2016.

Figura 43

Serie mensual de caudales medios de la estación hidrométrica puente Ayaviri

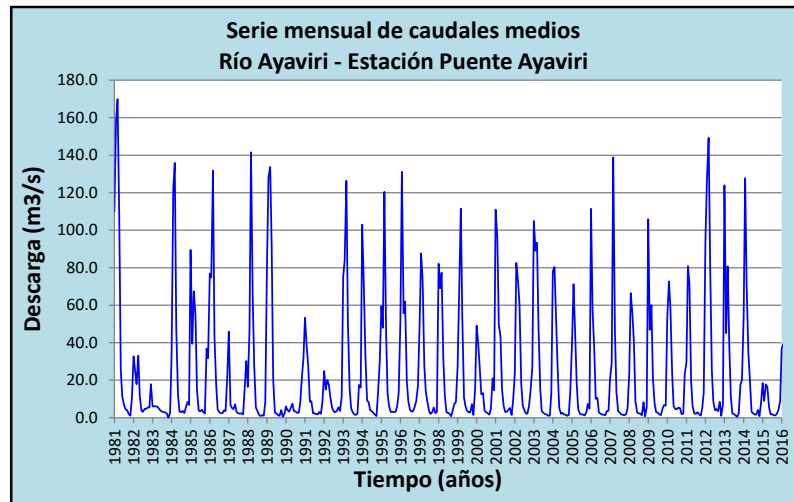
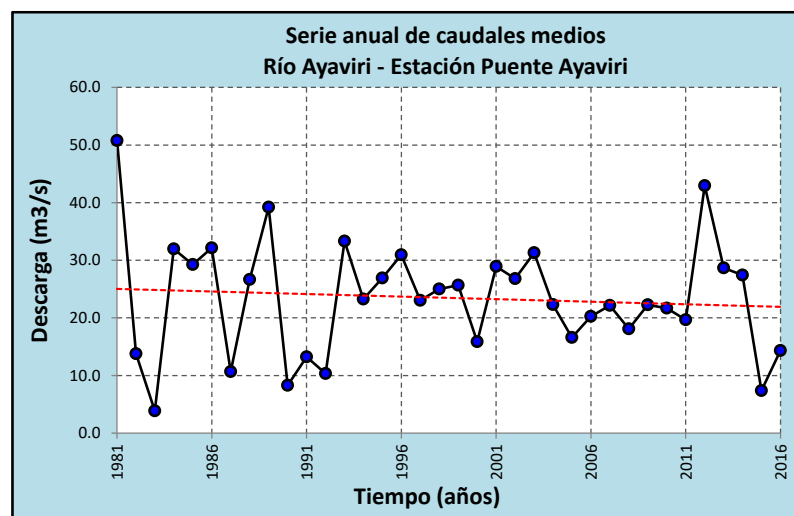


Figura 44

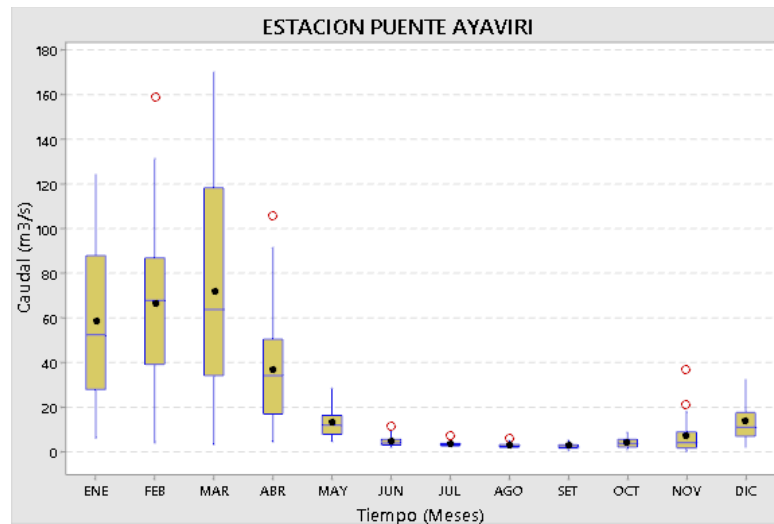
Serie anual de caudales medios de la estación hidrométrica puente Ayaviri



En la figura 45 se observa el diagrama de cajas (box plot) de los caudales medios mensuales observados de la estación hidrométrica Puente Ayaviri, donde se visualiza que los primeros cuatro meses del año (enero a abril) son los que registran mayores caudales, esta coincide con la estación húmeda o periodo de lluvias y los siguientes meses registran caudales mucho más bajos y casi constantes.

Figura 45

Diagrama de cajas de caudales mensuales estación hidrométrica Puente Ayaviri periodo 1981-2016



La tabla 28, proporciona información acerca de los percentiles P 25 (25%), P 50 (Media-50%) y P 75 (75%) a nivel mensual; por ejemplo, para el mes de enero, el valor mínimo y máximo de los caudales totales mensuales son de 5.97 y 123.98 m³/s respectivamente, y el 25% (P 25) y el 75% (P 75) de los datos están por debajo de 29.02 y 84.42 m³/s, y estos mismos valores son los umbrales donde se encuentra el 50% (Media-P 50) de los registros observados.

Tabla 28

Distribución de datos de caudales medios (m³/s) metodología de los percentiles

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Min.	5.97	4.01	3.21	4.44	4.52	1.75	1.82	1.23	0.38	0.86	0.01	2.01
P 25%	29.02	39.18	36.05	17.08	8.17	2.79	2.38	1.81	1.48	1.96	1.44	6.78
Mediana	52.22	67.75	63.66	33.92	11.81	3.76	2.90	2.29	1.99	3.53	3.87	10.86
Media	58.28	66.09	71.54	36.49	12.74	4.36	3.02	2.60	2.28	3.88	7.07	13.23
P 75%	84.42	85.11	113.69	48.90	15.70	5.37	3.48	3.14	2.91	5.40	8.53	16.98
Max.	123.98	158.85	169.95	105.48	28.16	11.34	6.83	5.38	5.03	8.41	36.84	32.03



4.1.3.2 Análisis de saltos y tendencias

4.1.3.2.1 Análisis de saltos

Después de haber analizado los hidrogramas, se efectuó al análisis estadístico de saltos de la información hidrométrica, en los parámetros como la media y la desviación estándar.

En la presente investigación, el análisis de saltos se ha realizado mediante la prueba estadística de Cusum y para la diferencia de medias la prueba de Rank Sum, empleando el Software TREND. Si los parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar de los períodos considerados en el análisis son estadísticamente iguales, entonces no se corrigen los datos.

En base a los resultados del análisis estadístico realizado, se concluye que la serie mensual de caudales medios mensuales del río Ayaviri, no muestran “Saltos” significativos al 95% de probabilidad de confianza, como se muestra en la tabla 29.

4.1.3.2.2 Análisis de tendencias (estacionariedad)

Luego del análisis de saltos en la serie mensual de caudales medios, se procedió a evaluar las tendencias para tal fin se usó la prueba estadística de Mann-Kendall, empleando para dicho cálculo el software TREND, donde se obtuvo como resultado que la serie mensual de caudales medios del río Ayaviri, no muestran “tendencias” significativas al 95% de probabilidad de confianza y por lo tanto la serie es estacionaria libre de tendencias, como se muestra en la tabla 29.

En resumen, luego de haber evaluado la consistencia de la información hidrométrica del río Ayaviri, la serie mensual de caudales medios mensuales es

libre de saltos y tendencias, es decir es una serie consistente, homogénea, estacionaria y confiable al 95% de probabilidad de confianza.

Tabla 29

Resultados de análisis de saltos y tendencias de la serie mensual de caudales

Prueba Estadística	Test statistic - calculated	Critical values - (Statistical table)				Resultados
		a=0.1	a=0.05	a=0.01		
Cusum	17	25.357	28.267	33.879	NS	El salto no es significativo estadísticamente al $\alpha=0.10$. Año de cambio de quiebre 1999.
Rank Sum	0.695	1.645	1.96	2.576	NS	La diferencia de la mediana de 1981-1998 y de 1999-2016 no es significativa al $\alpha=0.10$.
Mann-Kendall	-1.166	1.645	1.96	2.576	NS	La tendencia no es significativa estadísticamente al $\alpha=0.10$.

4.2 PRECIPITACIÓN MEDIA AREAL DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA

Para calcular la precipitación media mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, para el período 1981 al 2016, se empleó el módulo espacial del software Hydraccess, con el cual se calculó los valores medios de precipitación sobre la cuenca.

Con el módulo espacial se importó un archivo ArcView (shapefile) el cual representó el límite de la unidad hidrográfica del río Ayaviri y la información de las 21 estaciones pluviométricas generadas con el producto PISCO (figura 46), luego se determinó la precipitación media mensual de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, utilizando los métodos de polígonos de Thiessen, IDW y Kriging, considerando los valores medios para la cuenca el promedio de los tres métodos ya mencionados, en la figura 47 podemos observar el procesamiento realizado con el software Hydraccess.

Figura 46

Polígono de Thiessen de la unidad hidrográfica del río Ayaviri

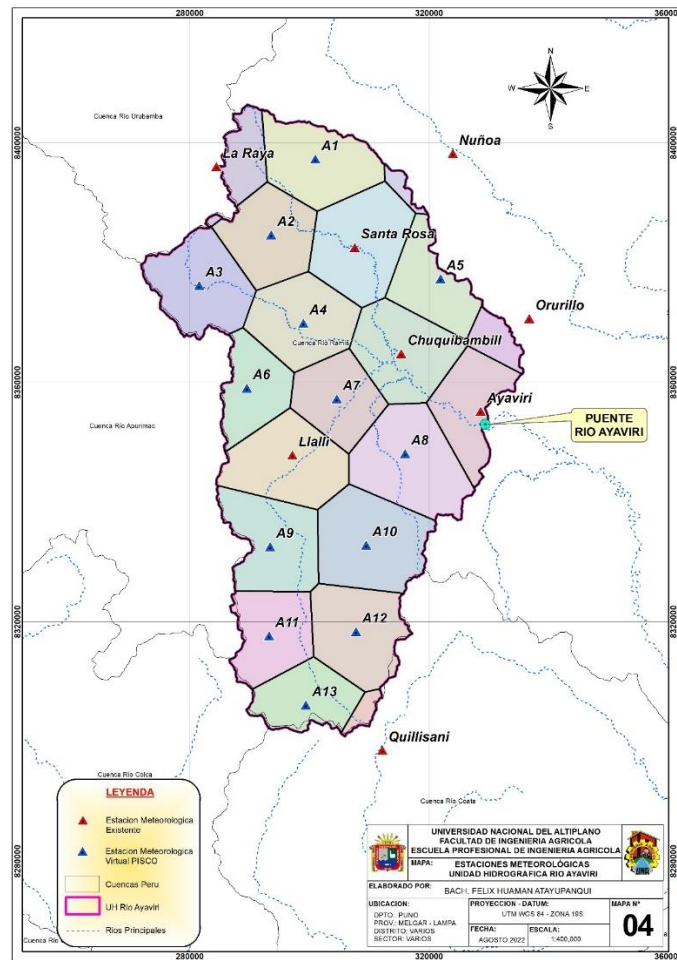


Figura 47

Determinación de la precipitación media en la unidad hidrográfica del río Ayaviri con el software Hydraccess

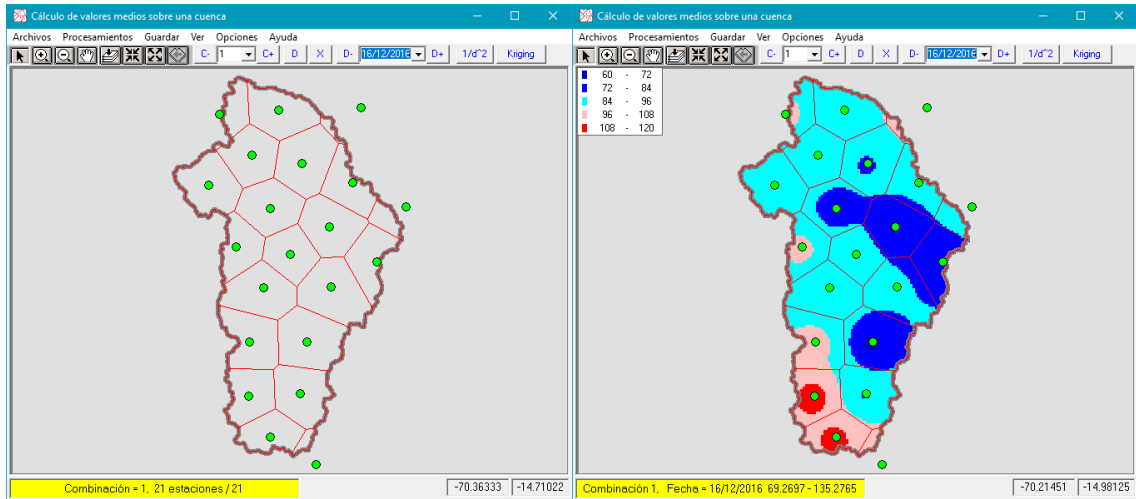




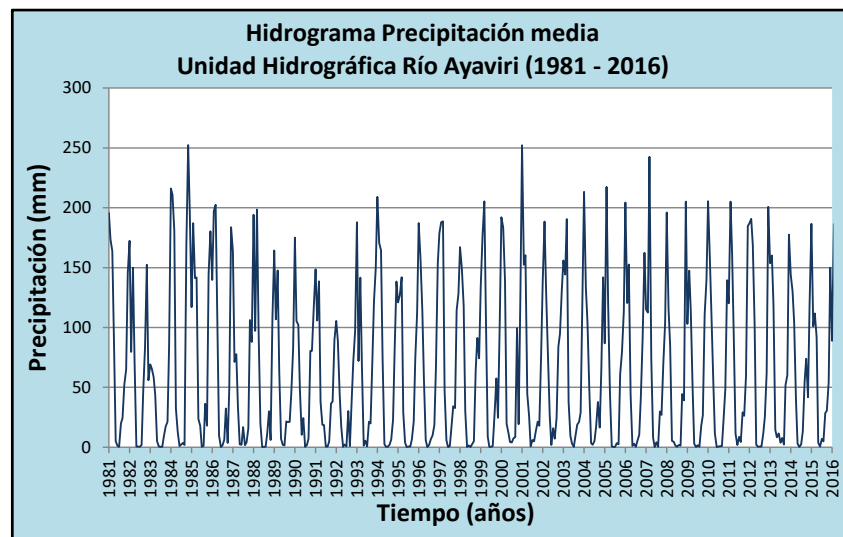
Tabla 30

Precipitación media de la unidad hidrográfica del río Ayaviri

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	195.7	173.5	164.0	81.6	4.9	1.1	0.3	19.8	24.4	52.5	64.9	145.1	927.7
1982	172.5	79.6	150.0	71.8	0.6	0.6	0.3	1.8	46.1	83.1	152.3	55.8	814.5
1983	69.1	65.5	58.5	43.7	5.0	0.6	0.4	0.4	9.0	17.4	21.0	83.9	374.6
1984	216.0	210.9	180.8	32.3	12.7	0.9	2.3	3.5	1.9	168.0	252.4	197.7	1279.6
1985	117.0	187.2	141.1	141.9	23.5	18.0	0.3	1.0	36.3	18.0	144.4	180.3	1009.0
1986	139.7	197.2	202.6	111.6	9.8	0.1	1.5	6.2	32.3	3.6	48.8	183.7	937.1
1987	163.6	71.2	77.7	34.6	2.5	2.0	16.7	1.7	4.0	15.7	106.1	87.9	583.7
1988	194.1	97.2	198.5	98.6	19.6	0.1	0.3	0.3	11.3	30.0	6.0	107.4	763.3
1989	164.3	106.7	147.7	63.5	7.0	1.9	1.4	21.4	21.0	21.2	44.8	81.8	682.7
1990	175.0	105.3	102.3	47.8	10.3	24.4	0.3	1.8	7.4	80.5	80.5	116.5	752.2
1991	148.5	105.9	138.6	37.6	18.7	18.6	0.5	0.5	4.9	36.4	38.2	89.5	637.9
1992	105.4	89.1	44.7	17.2	0.3	2.3	0.7	30.3	0.9	39.2	71.6	96.6	498.3
1993	187.9	72.0	141.6	67.8	1.2	5.5	0.6	21.3	19.8	72.1	121.5	149.9	861.4
1994	209.1	170.7	164.5	74.5	2.7	0.2	0.4	2.2	6.3	22.7	80.3	138.3	872.1
1995	121.1	126.9	142.0	29.0	3.7	0.1	0.5	0.5	6.6	21.4	74.4	112.1	638.4
1996	187.1	157.2	114.2	56.8	5.9	0.1	2.1	7.0	9.8	18.4	67.5	153.4	779.4
1997	178.7	188.0	188.6	47.5	5.8	0.1	0.9	16.2	34.1	32.7	114.1	128.2	934.8
1998	167.2	149.4	118.4	30.1	0.2	1.4	0.2	2.4	5.1	64.5	91.4	74.2	704.4
1999	133.2	176.3	205.4	107.1	8.8	0.2	0.4	0.9	27.6	57.4	24.5	106.0	847.9
2000	192.0	183.6	138.8	19.6	12.1	4.3	4.0	7.4	8.5	99.5	19.2	131.1	820.1
2001	252.2	152.3	160.4	44.6	26.1	0.8	6.0	4.9	13.7	21.3	17.9	76.8	776.9
2002	138.4	188.6	130.2	77.1	25.9	1.9	15.9	7.1	24.2	84.0	94.7	130.9	919.1
2003	156.0	144.3	190.6	37.6	9.2	3.1	0.4	9.1	18.9	21.1	28.8	127.0	746.1
2004	213.3	133.0	104.7	49.3	3.3	2.0	5.3	17.0	37.8	16.3	64.4	142.0	788.4
2005	86.8	217.3	120.4	45.2	0.7	0.1	0.4	3.4	2.5	61.1	79.5	113.2	730.7
2006	204.3	120.4	152.5	43.6	1.1	2.9	0.3	5.3	10.3	41.7	91.6	162.3	836.3
2007	115.2	112.5	242.6	73.8	7.9	0.2	4.2	0.4	29.8	27.0	69.8	104.2	787.6
2008	196.0	115.6	85.3	5.3	4.5	1.3	0.3	1.9	1.3	44.3	39.0	205.1	700.0
2009	102.9	147.4	113.5	48.9	2.8	0.1	1.7	0.4	17.9	26.7	110.8	139.7	712.9
2010	205.6	156.9	110.0	55.2	11.3	0.2	0.5	0.9	0.9	22.3	48.5	139.5	751.8
2011	120.3	205.1	160.4	84.2	11.0	1.9	8.7	4.3	29.1	26.2	59.3	184.7	895.2
2012	187.0	190.8	168.8	102.1	2.0	0.4	0.5	0.5	11.2	25.2	62.1	200.7	951.3
2013	153.7	160.2	118.4	14.4	8.3	11.5	3.8	7.7	2.3	51.9	60.1	177.5	769.8
2014	144.1	130.2	104.3	39.5	3.0	0.2	2.6	13.0	54.5	73.8	41.7	119.8	726.6
2015	186.5	100.9	111.7	91.7	3.8	0.6	6.9	4.9	28.6	30.5	54.2	149.9	770.1
2016	88.8	186.4	78.1	80.2	1.9	0.6	6.8	9.2	9.7	48.9	43.2	88.3	642.0
N' DATOS	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
MEDIA	160.8	143.8	138.1	58.5	7.7	3.1	2.7	6.6	16.9	43.8	71.9	130.0	784.0
DESV.STD	41.9	42.9	43.0	30.2	7.1	5.7	4.0	7.4	13.8	31.5	46.0	38.6	152.4
MIN	69.1	65.5	44.7	5.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.9	3.6	6.0	55.8	374.6
MAX	252.2	217.3	242.6	141.9	26.1	24.4	16.7	30.3	54.5	168.0	252.4	205.1	1279.6
MEDIANA	165.7	148.4	140.0	49.1	5.4	0.8	0.7	3.9	11.3	31.6	64.6	129.6	773.5

Figura 48

Hidrograma precipitación media de la unidad hidrográfica del río Ayaviri



4.3 SIMULACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Se emplearon los modelos hidrológicos: Lutz Scholz, GR2M y abcd en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, considerando 21 estaciones climatológicas y 01 estación hidrométrica (Puente Ayaviri).

4.3.1 Aplicación del modelo hidrológico de Lutz Scholz

4.3.1.1 Precipitación media mensual de la cuenca

Se determinó la precipitación media mensual de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, utilizando los métodos de polígonos de Thiessen, IDW y Kriging, considerando los valores medios para la cuenca el promedio de los tres métodos ya mencionados, la cual se muestra en la tabla 30.

4.3.1.2 Temperatura media mensual en la cuenca

En la tabla 31, se muestran los valores de las temperaturas media promedio mensual de las 21 estaciones las cuales son: Ayaviri, Chuquibambilla, La Raya,

Llalli, Nuñoa, Orurillo, Quillisani, Santa Rosa, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12 y A13, los mismos se ubican en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, cuyo periodo de información es desde 1981-2016, la variación de la temperatura es de 4 °C para el mes de julio y de 9.4 °C para el mes de diciembre. El promedio anual es de 7.4 °C.

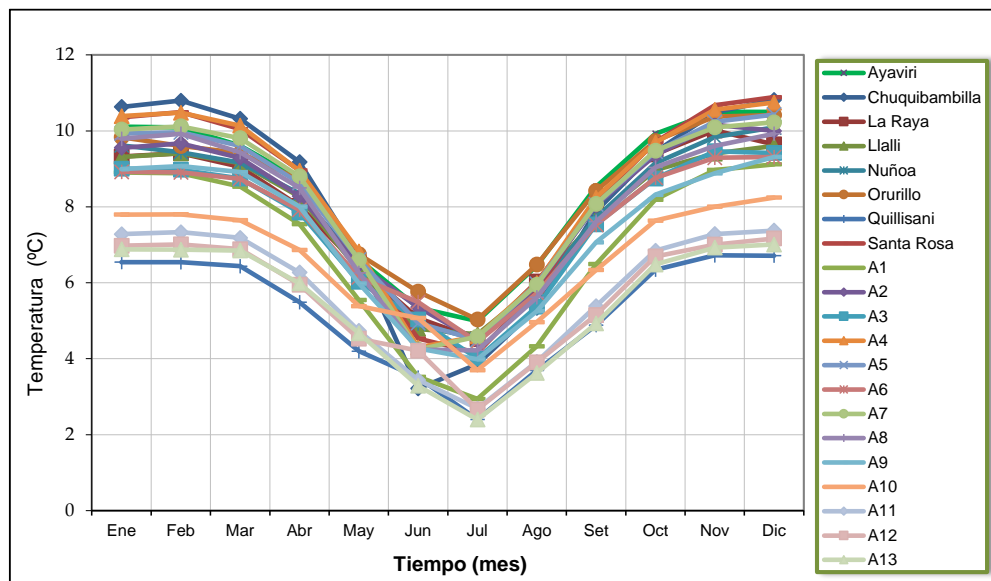
Tabla 31

Temperatura media mensual (°C) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri

N°	Estación	Altitud (msnm)	Mes												Prom Anual
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1	Ayaviri	3928	10.1	10.1	9.6	8.7	6.6	5.3	5.0	6.5	8.5	9.9	10.5	10.5	8.5
2	Chuquibambilla	3971	10.6	10.8	10.3	9.2	6.7	3.2	3.9	5.3	7.9	9.4	10.5	10.8	8.2
3	La Raya	4120	9.3	9.4	9.1	8.0	6.4	5.1	4.5	6.0	8.1	9.4	10.0	9.6	7.9
4	Llalli	3980	9.3	9.4	9.2	8.3	6.3	4.8	4.6	5.9	7.7	9.0	9.4	9.6	7.8
5	Nuñoa	4135	9.6	9.4	9.2	8.3	6.5	4.9	4.5	5.8	7.7	9.2	9.8	10.1	7.9
6	Orurillo	3920	9.8	9.6	9.4	8.7	6.8	5.8	5.0	6.5	8.4	9.7	10.4	10.4	8.4
7	Quillisani	4600	6.5	6.5	6.4	5.5	4.2	3.5	2.4	3.7	4.9	6.3	6.7	6.7	5.3
8	Santa Rosa	3966	10.4	10.5	10.0	9.0	6.7	4.5	4.2	5.8	8.2	9.7	10.7	10.9	8.4
9	A1	4908	8.9	8.9	8.5	7.5	5.5	3.5	2.9	4.3	6.5	8.2	9.0	9.1	6.9
10	A2	4720	9.6	9.7	9.3	8.3	6.5	5.4	4.5	5.9	8.0	9.4	10.2	10.0	8.0
11	A3	4173	9.0	9.0	8.7	7.9	6.0	5.0	4.0	5.4	7.5	8.7	9.5	9.4	7.5
12	A4	4006	10.4	10.5	10.1	9.0	6.8	4.3	4.6	6.0	8.2	9.7	10.6	10.7	8.4
13	A5	4395	9.9	10.0	9.6	8.6	6.6	4.9	4.5	6.0	8.1	9.5	10.2	10.4	8.2
14	A6	4774	8.9	8.9	8.7	7.9	6.1	5.5	4.4	5.7	7.5	8.8	9.3	9.3	7.6
15	A7	3975	10.0	10.1	9.8	8.8	6.6	4.2	4.6	5.9	8.1	9.5	10.1	10.2	8.2
16	A8	4151	9.8	9.9	9.4	8.5	6.3	4.2	4.2	5.6	7.6	9.0	9.6	9.9	7.8
17	A9	4406	9.0	9.1	8.9	8.0	6.0	4.3	4.0	5.3	7.1	8.3	8.9	9.3	7.3
18	A10	4903	7.8	7.8	7.6	6.9	5.4	5.1	3.7	5.0	6.3	7.6	8.0	8.2	6.6
19	A11	4621	7.3	7.3	7.2	6.3	4.7	3.4	2.7	3.9	5.4	6.8	7.3	7.4	5.8
20	A12	4971	7.0	7.0	6.9	6.0	4.5	4.2	2.7	3.9	5.2	6.7	7.0	7.2	5.7
21	A13	4761	6.9	6.9	6.9	6.0	4.7	3.3	2.4	3.6	4.9	6.5	6.9	7.0	5.5
PROMEDIO			9.1	9.1	8.8	7.9	6.0	4.5	4.0	5.3	7.2	8.6	9.3	9.4	7.4

Figura 49

Variación mensual de temperatura media – Promedio multianual



4.3.1.3 Evapotranspiración potencial

En la tabla 32, se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la evapotranspiración potencial mediante el método de Hargreaves, para ello se ha considerado la ubicación geográfica de la estación virtual A7: Latitud sur 14°51'7.9", Longitud Oeste 70°48'58.9" y Altitud: 3975 msnm., la cual representa el centroide de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, asimismo la temperatura media utilizada es el promedio de las temperaturas mensuales de las 21 estaciones consideradas en la investigación y los datos de horas reales de insolación se obtuvieron de la estación de Chuquibambilla.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la evapotranspiración potencial anual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri es de 1244.06 mm; obteniéndose valores en un rango de 80.79 a 125.80 mm, que corresponden a los meses de junio y octubre respectivamente.

Tabla 32

Resultados de la evapotranspiración potencial unidad hidrográfica del río Ayaviri

ESTACIÓN: A7 ALTITUD: 3975 msnm LATITUD: 14°51'7.9"
LONGITUD: 70°48'58.9"

Nº	PARÁMETRO	UND	MES												PROM
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	TEMPERATURA MEDIA	°C	9.1	9.1	8.8	7.9	6.0	4.5	4.0	5.3	7.2	8.6	9.3	9.4	7.4
2	TEMPERATURA MEDIA (TMF)	°F	48.3	48.4	47.9	46.2	42.8	40.1	39.1	41.6	45.0	47.5	48.7	48.9	45.4
3	HORAS REALES DE INSOLACIÓN (n)		4.66	4.99	5.38	7.03	8.40	8.68	9.14	8.70	7.77	7.42	7.04	5.51	7.06
4	HORAS MÁXIMAS DE INSOLACIÓN (N)		12.79	12.44	12.10	11.66	11.36	11.16	11.16	11.50	11.90	12.34	12.74	12.84	12.0
5	RELACIÓN EXTRATERRESTRE (Ra)	mm/día	16.69	16.24	15.26	13.51	11.83	10.93	11.23	12.67	14.46	15.80	16.49	16.69	14.3
6	DÍAS DEL MES RADIACIÓN		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
7	EXTRATERRESTRE MENSUAL		517.4	454.7	473.1	405.3	366.7	327.9	348.1	392.8	433.8	489.8	494.7	517.4	435.1
8	RADIACIÓN SOLAR EQUIVALENTE (RSM)		234.2	216.0	236.6	236.0	236.5	216.9	236.3	256.2	262.9	284.9	275.8	254.2	245.5
9	FACTOR DE CORRECCIÓN POR ALTITUD	FA	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239	1.239
10	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	mm/mes	105.09	97.01	105.16	101.22	94.03	80.79	85.90	99.01	109.93	125.80	124.69	115.42	103.7
11	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	mm/día	3.39	3.46	3.39	3.37	3.03	2.69	2.77	3.19	3.66	4.06	4.16	3.72	3.4
12	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL	mm/año	1244.06												

4.3.1.4 Coeficiente de escurrimiento

Los valores estimados del coeficiente de escurrimiento, así como el déficit de escurrimiento, mediante la fórmula de L. Turc, se muestran en la tabla 33, cuyos valores son de 0.45 y 431.60 mm/año, respectivamente.

Tabla 33

Resultados del coeficiente de escurrimiento – Método Turc

Parámetro	Und	Valor
Precipitación total anual promedio: P	mm/año	783.99
Temperatura media anual: T	°C	7.4
Coeficiente de temperatura: L		506.18
Déficit de escurrimiento: D	mm/año	431.60
Coeficiente de escurrimiento: C		0.45

Se utilizó también la ecuación del método de la Misión Alemana para determinar el coeficiente de escurrimiento, ya que es válido para la región de la

sierra del sur de Perú, obteniéndose el valor de 0.28 para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, como se muestra los resultados en la siguiente tabla.

Tabla 34

Resultados del coeficiente de escurrimiento– Método Misión Alemana

Parámetro	Und	Valor
Precipitación total anual promedio: P	mm/año	783.99
Temperatura media anual: T	°C	7.4
Evapotranspiración potencial total anual: ETP	mm/año	1244.06
Coeficiente de escurrimiento: C		0.28

Los valores de coeficiente de escurrimiento (C) calculados por los métodos de Turc y de la Misión Alemana, oscilan de 0.45 a 0.28, respectivamente. Estos valores se usarán como referencia, para poder iniciar con la calibración del modelo hidrológico; sin embargo, el valor real se encontrará después de la calibración del modelo.

4.3.1.5 Precipitación efectiva

Para determinar la precipitación efectiva el USBR (US Bureau of Reclamation) toma en cuenta que existe tres curvas tipo de precipitación efectiva en función de la precipitación total.

Tabla 35*Precipitación efectiva según el Bureau of Reclamation (USBR)*

P (mm)	P. Efectiva: PE (mm)		
	Curva I	Curva II	Curva III
0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	1.0	2.0
20.0	0.0	2.0	4.0
30.0	0.0	3.0	6.0
40.0	0.5	4.0	8.0
50.0	1.0	6.0	11.0
60.0	1.5	8.0	14.0
70.0	3.0	10.0	18.0
80.0	4.0	14.0	24.0
90.0	5.5	18.0	30.0
100.0	8.0	23.0	39.0
110.0	11.0	29.0	48.0
120.0	15.0	36.0	58.0
130.0	19.0	43.0	68.0
140.0	24.0	52.0	78.0
150.0	30.0	60.0	88.0
160.0	37.0	69.0	98.0
170.0	45.0	79.0	108.0
180.0	55.0	89.0	118.0

Para estimar la precipitación efectiva desde la lluvia real para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, estos valores deben ser interpolados mediante regresión polinomial, por ello los coeficientes de regresión son necesarios para interpolar de manera adecuada los valores de precipitación efectiva.

La figura 50 muestra las curvas que relacionan la precipitación efectiva y la precipitación total, utilizando ecuaciones polinomiales de quinto orden. Los valores de estos coeficientes se obtienen de la correlación entre la precipitación total y la precipitación efectiva correspondiente a cada curva, los mismos se presentan en la siguiente tabla.

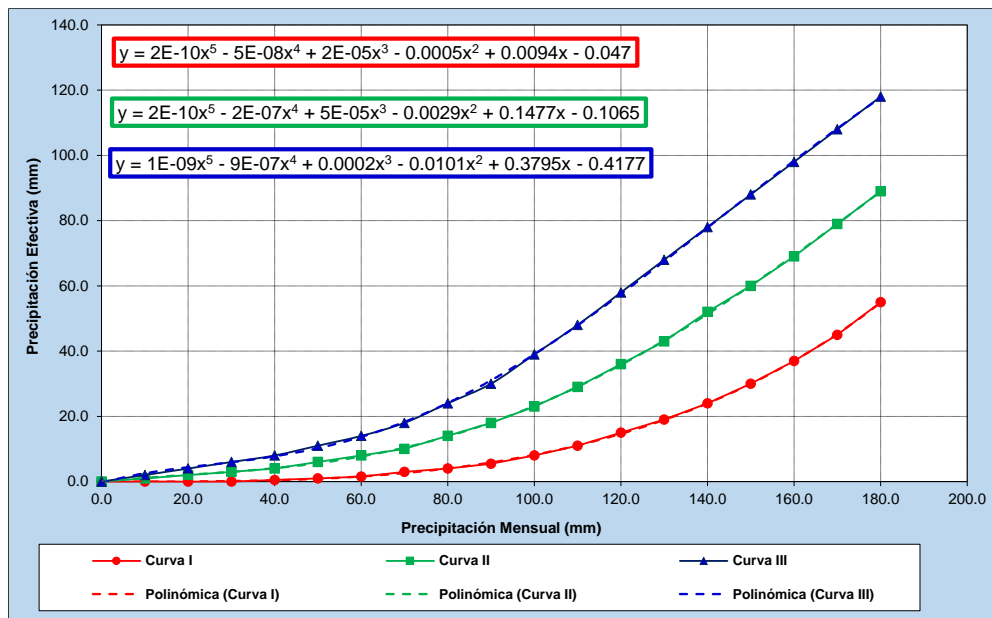
Tabla 36

Coefficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva

Coefficiente	Curva I	Curva II	Curva III
a0	-0.047000	-0.106500	-0.417700
a1	0.009400	0.147700	0.379500
a2	-0.000500	-0.002900	-0.010100
a3	0.000020	0.000050	0.000200
a4	-5.00E-08	-2.00E-07	-9.00E-07
a5	2.00E-10	2.00E-10	1.00E-09

Figura 50

Ecuación polinómica de la precipitación efectiva



Los resultados obtenidos de la precipitación efectiva se muestran en la tabla 37, en ella se puede observar que los valores de precipitación efectiva mensual fluctúan de 0.16 a 57.36 mm, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente, mientras que la precipitación efectiva anual es de 188.16 mm.

Tabla 37*Resultados de la precipitación efectiva mensual (mm)*

Mes	Precipitación Mensual				
	Total P mm	Efectiva			
		PE - I mm/mes	PE - II mm/mes	PE - III mm/mes	PE mm/mes
Ene	160.78	41.14	74.38	101.08	60.80
Feb	143.75	28.39	57.84	84.05	45.80
Mar	138.10	24.85	52.70	78.40	41.30
Abr	58.54	1.77	7.68	13.63	5.30
May	7.74	0.00	0.91	1.88	0.50
Jun	3.06	0.00	0.37	0.78	0.20
Jul	2.73	0.00	0.33	0.69	0.20
Ago	6.57	0.00	0.78	1.62	0.50
Set	16.95	0.00	1.83	3.74	1.10
Oct	43.80	0.76	4.83	9.05	3.20
Nov	71.93	3.19	11.50	19.75	8.10
Dic	130.04	20.37	45.73	70.34	35.40
Total	783.99	120.47	258.91	385.03	202.40

La precipitación efectiva (PE) calculada, será de gran utilidad para construir la ecuación de regresión lineal múltiple, la cual nos proporcionará los parámetros de la ecuación integral para la generación de caudales mensuales.

4.3.1.6 Retención de la cuenca

Considerando que en la unidad hidrográfica del río Ayaviri se encuentran lagunas que contribuyen a la retención, con una extensión aproximada de 60 km², nevados con una extensión aproximada de 80 km² y acuíferos con una extensión de 320 km², aproximadamente, estos datos son en base a estudios realizados por el Instituto Nacional de Recursos Naturales. Por lo tanto, la retención determinada es de 37.7 mm/año.

Tabla 38*Retención de la unidad hidrográfica del río Ayaviri*

Tipo de almacenamiento	Área de la Cuenca (km ²) =		3711.18	Retención total (km ² -mm/año)
	pendiente I	Lamina mm/año	Área (km ²)	
Acuíferos	$i < 2\%$	300.0	0.0	0.0
	$2\% < i < 8\%$	250.0	120.0	30000.0
	$i < 15\%$	200.0	200.0	40000.0
Lagunas +Bofedales	$i < 15\%$	500.0	60.0	30000.0
Nevados	$i < 15\%$	500.0	80.0	40000.0
Suma			460.0	140000.0
Lamina sobre la superficie de la cuenca (mm/año)				37.7

Nota. Adaptado de INRENA & Ramis (2008).

4.3.1.7 Coeficiente de agotamiento

La unidad hidrográfica del río Ayaviri, se ubica en una zona con vegetación escasa, poco desarrollada (Puna), considerando que es una cuenca con agotamiento rápido y mediana retención, y utilizando la fórmula empírica propuesto en la metodología del modelo, que corresponde según las características de la cuenca en estudio, se obtuvo el coeficiente de agotamiento “a” que tiene un valor de 0.00929.

4.3.1.8 Relación de caudales

Teniendo el valor calculado del coeficiente de agotamiento, considerando también el número de días de cada mes, se obtuvo la relación de caudales (bo), a partir de la fórmula empírica descrita en la metodología del modelo, resultando un valor de $bo = 0.757$.

4.3.1.9 Gasto de la retención

Los valores de contribución mensual de la época seca (abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre), calculados utilizando las fórmulas empíricas

del modelo, se pueden observar en la tabla 39, para el caso de los meses húmedos o lluviosos durante el año, no se consideran (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo). Por lo tanto, los gastos de la retención se encuentran en el rango de 1.80 a 10.10 mm/mes, estos valores corresponden a los meses de octubre y abril, respectivamente. Asimismo, el gasto de la retención anual es de 35.30 mm.

Tabla 39

Resultados del gasto de la retención mensual (mm/mes)

Mes	Gasto	
	bi	Gi (mm/mes)
Ene	0.000	0.00
Feb	0.000	0.00
Mar	0.000	0.00
Abr	0.757	10.10
May	0.567	7.60
Jun	0.429	5.70
Jul	0.322	4.30
Ago	0.241	3.20
Set	0.183	2.50
Oct	0.137	1.80
Nov	0.000	0.00
Dic	0.000	0.00
Total	2.636	35.30

4.3.1.10 Abastecimiento de la retención

Se observa en la tabla 40, los resultados del cálculo de la lámina de abastecimiento en el periodo húmedo y seco para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, donde el abastecimiento de la retención anual se obtuvo un valor de 35.30 mm, sin embargo, en el proceso de calibración del modelo se ha modificado los coeficientes a_i de abastecimiento en (%) de cada mes.

Tabla 40*Resultados del abastecimiento de la retención mensual (mm/mes)*

Mes	Abastecimiento	
	ai	Ai (mm/mes)
Ene	0.550	19.40
Feb	0.177	6.20
Mar	-0.100	-3.50
Abr	-0.250	-8.80
May	-0.028	-1.00
Jun	0.000	0.00
Jul	0.000	0.00
Ago	0.000	0.00
Set	0.000	0.00
Oct	0.021	0.70
Nov	0.048	1.70
Dic	0.582	20.50
Total	1.000	35.30

4.3.1.11 Generación de caudales mensuales para un año promedio

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 41. Los valores de los caudales mensuales generados durante el año promedio varían de 5.13 a 62.07 m³/s para los meses de agosto y marzo, respectivamente, asimismo se obtuvo un caudal promedio anual de 24.02 m³/s.

Tabla 41*Resultados generados y aforados de caudales mensuales para el año promedio (m^3/s)*

Mes	Caudales mensuales			
	Generados		Aforados	
	(mm/mes)	(m^3/s)	(m^3/s)	(mm/mes)
Ene	41.40	57.36	58.28	42.10
Feb	39.60	60.75	66.09	43.10
Mar	44.80	62.07	71.54	51.60
Abr	24.20	34.65	36.49	25.50
May	9.10	12.61	12.74	9.20
Jun	5.90	8.45	4.36	3.00
Jul	4.50	6.24	3.02	2.20
Ago	3.70	5.13	2.60	1.90
Set	3.60	5.15	2.28	1.60
Oct	4.30	5.96	3.88	2.80
Nov	6.40	9.16	7.07	4.90
Dic	14.90	20.65	13.23	9.50
Total	202.40	24.02	23.46	197.40

4.3.1.12 Generación de caudales para periodos extendidos

4.3.1.12.1 Precipitación efectiva de la cuenca

Para la generación de caudales para periodos extendidos, inicialmente se tiene que determinar la precipitación efectiva a partir de la precipitación media areal para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, determinado mediante el método de polígonos de Thiessen, IDW y Kriging, Los resultados de la precipitación efectiva calculada se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 42

Precipitación efectiva (mm) generada para la unidad hidrográfica del río Ayaviri

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1981	95.3	73.1	63.8	10.8	0.4	0.1	0.0	1.2	1.5	4.3	6.5	46.9
1982	72.1	10.2	51.0	8.1	0.0	0.0	0.0	0.1	3.4	11.3	53.0	4.8
1983	7.4	6.6	5.3	3.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.6	1.1	1.3	11.6
1984	115.6	110.5	80.4	2.1	0.8	0.1	0.2	0.3	0.1	67.7	152.0	97.3
1985	26.9	86.8	43.7	44.3	1.5	1.1	0.0	0.1	2.4	1.1	46.4	79.9
1986	42.6	96.8	102.2	23.8	0.7	0.0	0.1	0.4	2.1	0.3	3.8	83.3
1987	63.4	7.9	9.7	2.3	0.2	0.1	1.1	0.1	0.3	1.0	20.9	13.0
1988	93.7	16.7	98.1	17.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.8	1.9	0.4	21.5
1989	64.1	21.2	49.1	6.2	0.5	0.1	0.1	1.3	1.3	1.3	3.3	10.9
1990	74.6	20.4	19.0	3.6	0.7	1.5	0.0	0.1	0.5	10.5	10.5	26.6
1991	49.8	20.8	41.7	2.5	1.2	1.2	0.0	0.0	0.3	2.4	2.6	13.6
1992	20.5	13.4	3.3	1.1	0.0	0.2	0.0	1.9	0.1	2.7	8.0	16.4
1993	87.5	8.1	44.1	7.1	0.1	0.4	0.0	1.3	1.2	8.2	29.6	51.0
1994	108.7	70.3	64.3	8.8	0.2	0.0	0.0	0.2	0.4	1.4	10.4	41.5
1995	29.4	33.2	44.4	1.8	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	1.3	8.7	24.1
1996	86.7	57.4	25.2	5.0	0.4	0.0	0.2	0.5	0.7	1.2	7.0	54.0
1997	78.3	87.6	88.2	3.6	0.4	0.0	0.1	1.0	2.2	2.1	25.2	34.1
1998	66.9	50.5	27.7	1.9	0.0	0.1	0.0	0.2	0.4	6.4	14.3	8.7
1999	37.6	75.9	105.0	21.4	0.6	0.0	0.0	0.1	1.7	5.1	1.5	20.8
2000	91.6	83.2	41.9	1.2	0.8	0.3	0.3	0.5	0.6	17.7	1.2	36.1
2001	151.8	53.1	60.4	3.3	1.6	0.0	0.4	0.4	0.9	1.3	1.1	9.4
2002	41.6	88.2	35.5	9.5	1.6	0.1	1.0	0.5	1.5	11.6	15.6	36.0
2003	56.3	46.2	90.2	2.5	0.6	0.2	0.0	0.6	1.2	1.3	1.8	33.2
2004	112.9	37.5	20.2	3.8	0.2	0.1	0.4	1.1	2.6	1.0	6.4	44.4
2005	12.6	116.9	28.9	3.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	5.7	10.2	24.7
2006	103.9	28.9	53.2	3.1	0.1	0.2	0.0	0.4	0.7	2.9	14.4	62.2
2007	25.8	24.3	142.2	8.6	0.5	0.0	0.3	0.0	1.9	1.7	7.6	19.9
2008	95.6	26.0	12.1	0.4	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1	3.2	2.7	104.7
2009	19.3	48.8	24.8	3.8	0.2	0.0	0.1	0.0	1.1	1.7	23.3	42.6
2010	105.2	57.2	22.9	4.7	0.8	0.0	0.0	0.1	0.1	1.4	3.7	42.4
2011	28.9	104.7	60.4	11.7	0.7	0.1	0.6	0.3	1.8	1.6	5.4	84.3
2012	86.6	90.4	68.4	18.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8	1.6	5.9	100.3
2013	54.2	60.2	27.7	0.9	0.6	0.8	0.3	0.5	0.2	4.2	5.5	77.1
2014	46.1	35.4	19.9	2.7	0.2	0.0	0.2	0.9	4.6	8.6	2.9	28.6
2015	86.1	18.3	23.8	14.4	0.3	0.0	0.5	0.4	1.8	1.9	4.5	50.9
2016	13.3	86.0	9.8	10.4	0.1	0.0	0.5	0.6	0.7	3.8	3.1	13.1
Prom.	65.4	52.0	47.5	7.7	0.5	0.2	0.2	0.4	1.1	5.6	14.5	40.8

4.3.1.12.2 Números aleatorios

Se generó la serie de los números aleatorios normalmente distribuidos, que cumplan la condición de tener una media igual a cero y desviación estándar igual a 1. En la tabla 43, se presentan la información empleada.

Tabla 43*Números aleatorios generados con distribución normal (0,1)*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1981	0.56	1.30	1.48	-0.15	-0.78	-1.06	0.08	-0.96	0.06	0.86	-0.55	-0.20
1982	0.60	-1.11	0.73	0.23	-0.65	-0.93	-0.41	-1.16	-1.11	0.91	-0.36	-0.04
1983	0.04	-0.08	-0.15	0.41	0.12	0.24	-0.07	0.83	1.10	0.22	-1.09	1.22
1984	-0.55	-0.06	-0.05	-0.40	-0.21	-1.19	-1.06	-0.55	0.53	0.14	0.77	0.97
1985	-0.79	-1.54	0.23	-0.71	-2.24	-0.59	0.33	-0.22	-0.16	-1.12	1.20	0.67
1986	1.15	1.70	-0.65	0.95	-0.68	0.45	1.65	-1.62	-0.28	-2.18	0.21	-0.09
1987	-1.18	-0.23	-0.54	0.25	1.18	-0.38	-0.41	0.32	-0.95	-1.37	-0.57	0.32
1988	-0.80	2.51	-1.53	-1.18	1.04	-0.44	-0.20	0.05	-1.41	0.98	-1.31	-0.79
1989	2.26	-0.07	-1.37	-1.94	0.33	-2.58	-0.43	0.20	-1.78	-0.03	-0.85	0.51
1990	-1.63	0.17	0.83	0.63	-1.18	-0.42	1.11	0.24	0.89	0.22	0.08	0.27
1991	0.87	-0.55	1.19	1.36	-0.08	-0.09	-0.21	0.19	-0.14	0.78	1.04	0.41
1992	1.29	-1.37	-1.66	-0.65	0.89	-0.20	-0.07	1.15	0.39	-0.56	0.71	0.37
1993	0.37	0.85	2.39	1.84	0.69	0.04	-0.15	-0.17	0.54	-0.77	-1.03	1.13
1994	-0.19	-1.03	-1.83	0.49	-0.19	-0.03	1.56	0.07	-0.03	-0.69	1.17	-0.81
1995	0.67	1.26	-1.37	0.34	-1.40	-0.12	0.49	-1.11	-1.20	-0.68	-0.59	0.17
1996	-0.62	1.23	-2.13	0.42	0.21	-0.26	-0.27	-1.05	-1.06	-1.11	0.36	-0.22
1997	-0.95	-2.56	-0.99	0.23	0.27	0.52	-1.84	0.82	2.50	1.22	-0.02	0.86
1998	0.20	-2.98	0.84	-0.23	-1.31	-0.03	1.76	-2.42	0.41	1.31	-0.11	-1.35
1999	1.80	0.37	-0.85	0.19	-0.84	-0.70	0.23	-0.18	0.15	0.56	0.28	1.21
2000	1.93	1.65	-2.10	-0.64	-1.54	0.39	0.26	1.25	0.28	-1.81	-1.60	-0.57
2001	-0.61	-0.51	0.49	-0.67	-0.85	-0.02	-1.12	0.81	-2.58	-0.29	-0.40	0.47
2002	2.03	-0.20	1.14	0.31	-0.80	-0.80	0.90	-2.01	0.83	1.24	-0.02	0.52
2003	1.69	-1.85	0.58	2.39	1.74	0.22	-0.58	-0.08	0.02	-0.98	1.38	0.58
2004	0.06	-0.14	-0.69	0.56	-0.33	-0.92	-0.95	-0.37	-0.04	0.35	0.03	-0.13
2005	-0.35	0.53	-1.64	-0.75	1.16	0.44	1.67	2.08	-0.26	0.04	2.13	-1.66
2006	-1.16	1.07	-0.73	0.98	-0.91	-1.82	-0.51	-0.72	-0.33	-0.61	-0.28	0.40
2007	0.48	-0.09	-1.12	2.28	-0.35	0.87	-1.17	-1.93	0.27	-1.80	-3.14	-0.28
2008	-1.41	-0.34	2.35	-1.23	-1.19	-0.49	1.58	-2.04	-0.11	0.32	0.94	-0.52
2009	0.44	1.00	-0.50	1.26	1.84	-0.02	1.09	-0.46	0.72	-0.46	0.69	1.38
2010	-0.42	-0.39	-0.59	-0.66	-1.77	1.57	0.86	-0.33	1.68	-0.58	-0.15	-0.27
2011	-0.47	-1.29	-0.98	-1.22	-0.34	0.67	-0.20	0.49	0.73	0.05	-0.80	0.51
2012	-1.73	0.80	0.44	-0.09	-0.84	-0.57	-1.66	1.54	0.51	-0.20	-0.21	-0.83
2013	0.86	0.51	0.19	0.15	0.43	0.77	-1.87	1.46	0.15	1.17	-0.55	-0.63
2014	1.90	0.99	0.69	0.52	-0.54	-0.12	-0.57	1.34	-0.27	-0.78	-0.72	0.45
2015	-0.33	-0.08	0.80	1.21	-1.34	-0.89	-1.12	1.95	0.62	-0.22	-1.97	0.01
2016	-0.87	0.93	-1.09	-0.20	-0.38	1.16	-1.53	-0.08	-0.17	0.33	1.39	-0.40

4.3.1.12.3 Descargas medias mensuales generadas

Para calcular los parámetros b_1 , b_2 , b_3 , r y S , tomando en cuenta la base de los resultados obtenidos para el año promedio, se realiza el análisis de regresión múltiple, considerando para ello el Q_t como valor dependiente y Q_{t-1}



y PEt, como valores independientes, estos datos mencionados de las variables se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 44

Datos de la variable dependiente e independiente

Variables Independientes		V. Depend.
Qt-1 X1	PEt X2	Qt Y
14.90	60.80	41.40
41.40	45.80	39.60
39.60	41.30	44.80
44.80	5.30	24.20
24.20	0.50	9.10
9.10	0.20	5.90
5.90	0.20	4.50
4.50	0.50	3.70
3.70	1.10	3.60
3.60	3.20	4.30
4.30	8.10	6.40
6.40	35.40	14.90

En el análisis de regresión lineal múltiple, se obtuvieron como resultados:

Coefficientes de la regresión lineal múltiple: $b_1 = 0.30066$

Coefficientes de la regresión lineal múltiple: $b_2 = 0.47486$

Coefficientes de la regresión lineal múltiple: $b_3 = 0.50732$

Error estándar de la regresión múltiple: $S = 3.34412$

Coefficiente de correlación múltiple: $r = 0.97861$

Considerando la ecuación integral para la generación de caudales medios mensuales para periodos extendidos, tomando en cuenta los parámetros del modelo que fueron calculados como son los coeficientes de la regresión lineal múltiple, error estándar de la regresión múltiple, coeficiente de correlación múltiple, precipitación efectiva y caudal del mes anterior, se procedió a calcular la serie de descargas media mensuales (mm) generadas para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, cuya información se muestran en la tabla 45.

Tabla 45

*Descargas medias mensuales generados (mm) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri
con Lutz Scholz*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1981	56.1	64.9	64.5	36.3	17.2	7.8	4.1	2.2	2.1	4.1	5.2	26.4
1982	49.8	28.4	40.2	23.7	11.1	4.9	2.3	0.6	1.5	7.4	30.5	17.2
1983	12.3	9.4	7.4	5.7	3.3	2.0	1.2	1.4	2.0	2.0	1.2	7.6
1984	62.2	85.9	81.8	39.9	19.5	8.8	3.9	1.9	1.6	35.5	94.8	95.3
1985	58.7	71.2	56.4	49.1	22.8	11.3	5.9	3.0	2.8	1.4	25.3	53.3
1986	48.0	73.4	86.6	54.1	25.9	12.9	7.6	3.0	2.6	0.2	2.5	43.7
1987	52.4	29.0	18.6	10.5	6.2	3.0	2.0	1.5	0.5	0.1	10.6	12.1
1988	53.0	35.7	66.0	39.6	20.4	9.7	4.8	2.6	1.0	2.4	0.7	11.0
1989	39.6	29.8	38.4	20.3	10.4	3.5	1.7	1.9	0.6	1.2	2.0	7.1
1990	40.4	30.0	24.8	14.3	6.6	3.9	2.9	1.9	2.1	6.8	8.9	18.2
1991	34.8	27.0	35.1	19.2	10.0	5.6	2.8	1.8	1.2	2.6	3.6	9.2
1992	16.0	13.8	7.4	3.9	2.8	1.6	1.0	2.5	1.8	2.1	5.8	11.6
1993	50.5	29.0	38.1	23.3	11.9	6.2	3.1	2.3	2.4	5.1	17.0	35.0
1994	71.9	69.4	64.6	35.8	17.3	8.5	5.4	3.0	1.9	1.4	7.0	24.1
1995	27.1	30.9	36.6	18.8	8.4	4.2	2.6	0.8	0.1	0.5	4.5	14.8
1996	50.9	54.4	37.5	20.9	10.6	5.2	2.7	1.1	0.5	0.4	4.3	29.6
1997	53.4	68.3	76.8	38.8	19.1	9.7	3.7	3.1	4.6	4.4	15.2	25.4
1998	46.4	45.9	36.7	18.5	8.2	4.2	3.5	0.4	1.0	4.9	9.8	8.4
1999	24.6	50.7	77.1	47.9	22.8	10.6	5.5	2.8	2.6	4.5	3.4	13.3
2000	54.4	69.5	53.1	25.7	11.9	6.4	3.7	3.2	2.3	9.1	4.1	20.2
2001	86.5	68.0	63.6	31.7	15.6	7.7	3.4	2.7	0.3	0.9	1.0	5.9
2002	25.6	57.1	46.2	27.3	13.5	6.2	4.4	1.3	2.3	8.1	12.0	24.6
2003	41.7	42.3	66.5	34.8	18.3	9.2	4.3	2.6	2.2	1.3	2.8	18.9
2004	66.6	50.9	34.2	18.9	9.1	4.0	1.8	1.5	2.3	2.1	4.6	24.9
2005	18.3	68.7	46.5	23.5	12.3	6.4	4.5	4.0	2.1	4.2	8.9	15.9
2006	59.8	44.1	47.7	25.2	11.7	4.7	2.2	1.1	0.9	1.8	8.3	36.1
2007	30.9	27.2	84.6	46.4	22.3	11.5	5.1	1.4	2.1	0.9	2.4	11.3
2008	53.2	38.5	26.3	12.1	5.4	2.6	2.6	0.2	0.4	2.3	3.4	54.7
2009	36.4	43.0	33.0	18.8	10.6	5.3	3.6	1.7	2.2	1.9	13.5	29.3
2010	67.3	61.0	40.5	21.5	9.7	6.0	3.7	1.9	2.4	1.7	2.9	23.0
2011	25.6	64.7	61.0	34.4	16.8	8.8	4.6	3.0	3.1	2.6	3.7	45.2
2012	64.5	77.3	72.0	44.0	20.7	9.7	3.8	3.2	2.6	2.2	4.2	52.6
2013	53.4	56.6	41.4	20.5	10.6	6.3	2.2	2.6	1.7	4.0	4.6	41.2
2014	44.6	40.1	29.9	16.2	7.7	3.9	1.9	2.6	3.7	5.9	4.1	17.1
2015	51.9	34.2	29.2	22.3	10.1	4.5	1.9	2.7	2.9	2.5	2.4	27.3
2016	19.4	53.8	30.1	19.7	9.4	5.6	2.2	1.6	1.3	3.1	4.3	8.7
Prom.	45.8	48.4	47.2	26.8	13.1	6.5	3.4	2.1	1.9	3.9	9.4	25.6

Tomando en cuenta el área de drenaje de la unidad hidrográfica que es de 3711.18 km² hasta el punto de aforo, y el número de días de cada mes, en la tabla 46, se presenta la serie de descargas media mensuales (m³/s) generadas para la

unidad hidrográfica del río Ayaviri. Asimismo, se puede observar que la descarga media anual generada del río Ayaviri es de 27.73 m³/s.

Tabla 46

Descargas medias mensuales generados (m³/s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con Lutz Scholz

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
1981	77.73	96.13	89.37	51.97	23.83	11.17	5.68	3.05	3.01	5.68	7.45	36.58	34.30
1982	69.00	43.57	55.70	33.93	15.38	7.02	3.19	0.83	2.15	10.25	43.67	23.83	25.71
1983	17.04	14.42	10.25	8.16	4.57	2.86	1.66	1.94	2.86	2.77	1.72	10.53	6.57
1984	86.18	131.78	113.34	57.13	27.02	12.60	5.40	2.63	2.29	49.19	135.73	132.05	62.95
1985	81.33	105.46	78.15	70.30	31.59	16.18	8.18	4.16	4.01	1.94	36.22	73.85	42.61
1986	66.51	112.60	119.99	77.46	35.89	18.47	10.53	4.16	3.72	0.28	3.58	60.55	42.81
1987	72.61	44.49	25.77	15.03	8.59	4.30	2.77	2.08	0.72	0.14	15.18	16.77	17.37
1988	73.44	54.77	91.45	56.70	28.27	13.89	6.65	3.60	1.43	3.33	1.00	15.24	29.15
1989	54.87	44.14	53.21	29.07	14.41	5.01	2.36	2.63	0.86	1.66	2.86	9.84	18.41
1990	55.98	46.02	34.36	20.47	9.14	5.58	4.02	2.63	3.01	9.42	12.74	25.22	19.05
1991	48.22	41.42	48.63	27.49	13.86	8.02	3.88	2.49	1.72	3.60	5.15	12.75	18.10
1992	22.17	21.17	10.25	5.58	3.88	2.29	1.39	3.46	2.58	2.91	8.30	16.07	8.34
1993	69.97	42.95	52.79	33.36	16.49	8.88	4.30	3.19	3.44	7.07	24.34	48.50	26.27
1994	99.62	106.46	89.51	51.26	23.97	12.17	7.48	4.16	2.72	1.94	10.02	33.39	36.89
1995	37.55	47.40	50.71	26.92	11.64	6.01	3.60	1.11	0.14	0.69	6.44	20.51	17.73
1996	70.53	83.45	51.96	29.92	14.69	7.45	3.74	1.52	0.72	0.55	6.16	41.01	25.98
1997	73.99	101.16	106.41	55.55	26.46	13.89	5.13	4.30	6.59	6.10	21.76	35.19	38.04
1998	64.29	70.41	50.85	26.49	11.36	6.01	4.85	0.55	1.43	6.79	14.03	11.64	22.39
1999	34.09	77.78	106.83	68.58	31.59	15.18	7.62	3.88	3.72	6.24	4.87	18.43	31.57
2000	75.38	106.62	73.58	36.80	16.49	9.16	5.13	4.43	3.29	12.61	5.87	27.99	31.45
2001	119.85	100.72	88.12	45.39	21.62	11.02	4.71	3.74	0.43	1.25	1.43	8.18	33.87
2002	35.47	87.59	64.01	39.09	18.71	8.88	6.10	1.80	3.29	11.22	17.18	34.09	27.29
2003	57.78	64.89	92.14	49.83	25.36	13.17	5.96	3.60	3.15	1.80	4.01	26.19	28.99
2004	92.28	78.08	47.39	27.06	12.61	5.73	2.49	2.08	3.29	2.91	6.59	34.50	26.25
2005	25.36	101.76	64.43	33.65	17.04	9.16	6.24	5.54	3.01	5.82	12.74	22.03	25.57
2006	82.86	67.65	66.09	36.08	16.21	6.73	3.05	1.52	1.29	2.49	11.88	50.02	28.82
2007	42.81	41.73	117.22	66.43	30.90	16.47	7.07	1.94	3.01	1.25	3.44	15.66	28.99
2008	73.71	59.06	36.44	17.32	7.48	3.72	3.60	0.28	0.57	3.19	4.87	75.79	23.84
2009	50.44	63.69	45.72	26.92	14.69	7.59	4.99	2.36	3.15	2.63	19.33	40.60	23.51
2010	93.25	93.58	56.12	30.78	13.44	8.59	5.13	2.63	3.44	2.36	4.15	31.87	28.78
2011	35.47	99.25	84.52	49.25	23.28	12.60	6.37	4.16	4.44	3.60	5.30	62.63	32.57
2012	89.37	118.58	99.76	63.00	28.68	13.89	5.27	4.43	3.72	3.05	6.01	72.88	42.39
2013	73.99	83.83	57.36	29.35	14.69	9.02	3.05	3.60	2.43	5.54	6.59	57.09	28.88
2014	61.80	61.52	41.43	23.19	10.67	5.58	2.63	3.60	5.30	8.18	5.87	23.69	21.12
2015	71.91	52.46	40.46	31.93	13.99	6.44	2.63	3.74	4.15	3.46	3.44	37.83	22.70
2016	26.88	82.53	41.71	28.21	13.02	8.02	3.05	2.22	1.86	4.30	6.16	12.05	19.17
Prom.	63.44	73.59	65.45	38.32	18.10	9.24	4.72	2.89	2.69	5.45	13.50	35.42	27.73

4.3.1.13 Calibración

Para el proceso de calibración se utilizó el año promedio generado y año promedio observado del río Ayaviri, la cual permite el ajuste de los parámetros del modelo como son: el coeficiente de escurrimiento (C), la retención anual de la cuenca (R), coeficiente de agotamiento (a), coeficientes para el gasto (bi) y abastecimiento (ai), obteniendo una curva de calibración bastante aceptable con un coeficiente de correlación 0.9898 muy bueno, conforme se muestra en las figuras 51 y 52.

Figura 51

Calibración de caudales generados para un año promedio modelo Lutz Scholz

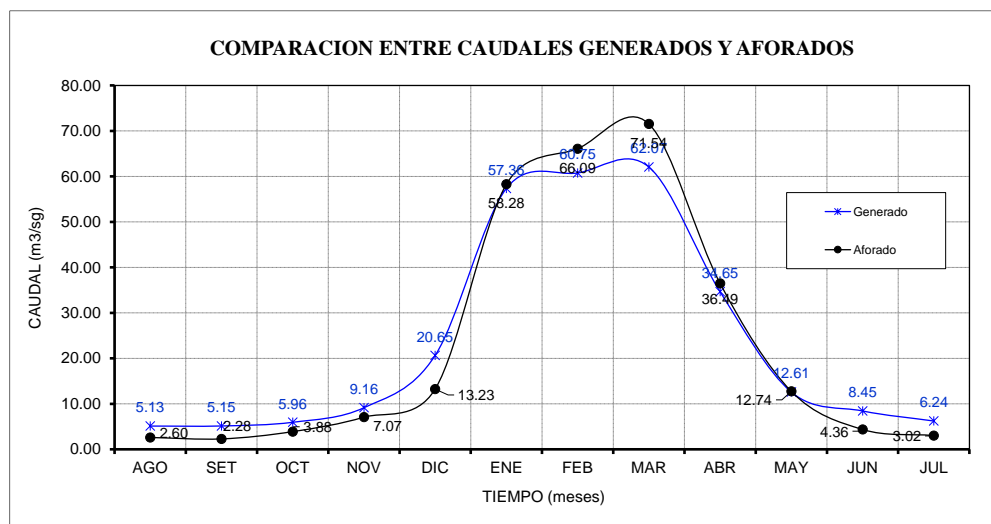
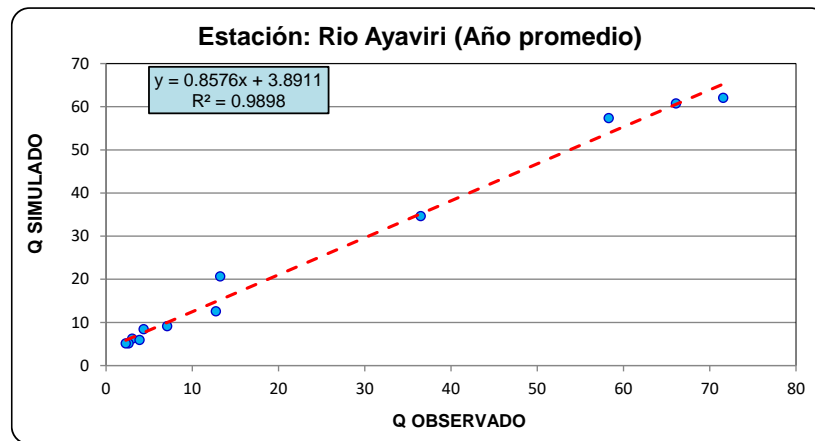


Figura 52

Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo

Lutz Scholz



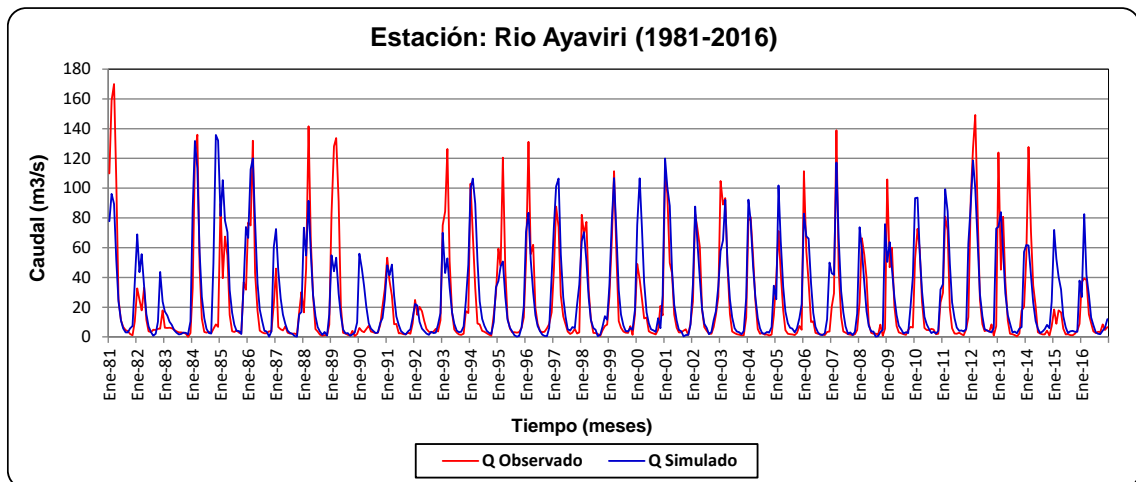
4.3.1.14 Validación

Para la validación se ha tomado el periodo extendido 1981-2016, en el hidrograma de validación que se muestra en la figura 53, se puede observar que se presentan 9 periodos no satisfactorios que son de los años 1981, 1989, 1993, 1995 y 2014 donde los caudales simulados subestiman a los caudales observados, y los años 1984, 1985, 2000, 2008 y 2012 los caudales simulados sobreestiman los caudales observados, en general se puede definir que los caudales simulados tienen una buena correlación.

Figura 53

Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo

Lutz Scholz

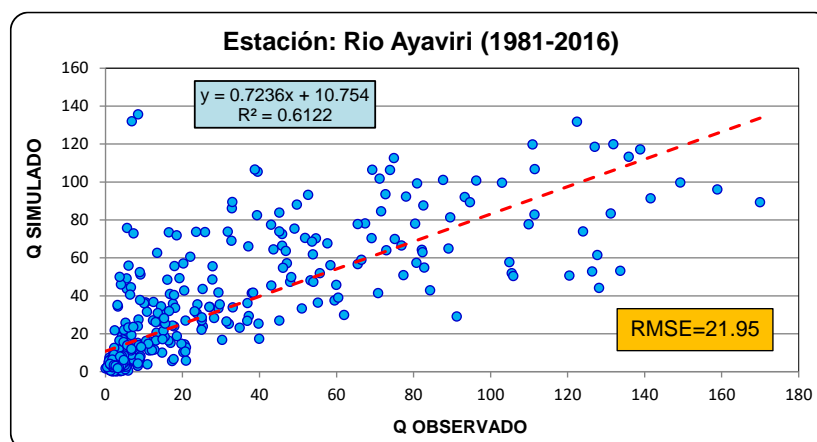


Al realizar una regresión entre los caudales generados y los caudales aforados se obtiene la siguiente ecuación: $Q_{sim} = 0.7236 \cdot Q_{obser} + 10.754$, obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.6122$, que es altamente significativo, conforme se puede apreciar en la figura 54.

Figura 54

Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo Lutz

Scholz



4.3.1.15 Test estadístico

Se realizó las pruebas estadísticas planteadas por el experto Lutz Scholz, que son la prueba T-Student y Fisher, de igual forma se compara la media, desviación estándar y la varianza de los caudales aforados y los caudales generados.

Tabla 47

Resultados del test estadístico del modelo Lutz Scholz

Parámetro	Q Generado	Q Aforado
Media	27.73	23.46
Varianza	974.27	1139.01
Desviación Estándar	31.21	33.75
Nº datos	432	432
Grados de libertad	431	431
T calculado	1.9302	OK _j
T tabular	1.9627	
F calculado	1.1691	OK _j
F tabular	1.1719	

De los resultados presentados en la tabla anterior, la media de los caudales generados es iguales estadísticamente a la media de los caudales aforados, puesto que el valor de T calculado (1.9302) es menor que el valor de T tabular (1.9627); y la desviación estándar de los caudales generados son estadísticamente iguales a la desviación estándar de los caudales aforados, dado que el valor de F calculado (1.1691) es menor que F tabular (1.1719).

4.3.2 Aplicación del modelo hidrológico de GR2M

El modelo GR2M consta de dos procesos que son: calibración y validación. El objetivo de la calibración es obtener valores óptimos de los parámetros contenidos en el modelo hidrológico, para lograr un sistema sea lo más próximo al sistema real que el modelo representa.

La validación se realiza con el propósito de verificar la calidad de los ajustes de la etapa de calibración, la calidad y confiabilidad de la información disponible para la corrida del modelo, consiste en usar los mismos parámetros determinados en el proceso de calibración, pero en un periodo diferente.

Se vio por conveniente distribuir el periodo de registro en dos etapas, en base a la importancia de cada uno teniendo como etapa de calibración desde enero de 1981 a diciembre de 2004 y la etapa de validación de enero de 2005 a diciembre de 2016. La tabla 48 muestra el periodo considerado para ambas etapas.

Tabla 48

Período de calibración y validación del área de estudio

CALIBRACIÓN CON 2/3 DE LA DATA TOTAL																								VALIDACIÓN 1/3 DE LA DATA TOTAL											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016

4.3.2.1 Cálculo de la evapotranspiración mensual

La evapotranspiración potencial (ETP) fue calculada utilizando los datos de temperatura mínima, máxima y media, para cada estación meteorológica (periodo 1981-2016), para ello se usó la fórmula de Hargreaves y Samani (1985), luego se realizó el proceso de interpolación y/o valor areal de la ETP para la cuenca, empleando el complemento Spatial del software Hydraccess, utilizando los métodos de polígonos de Thiessen, IDW y Kriging, considerando finalmente los valores medios para la cuenca el promedio de los tres métodos ya mencionados, en la figura 55 podemos observar el procesamiento realizado con el software Hydraccess y en la tabla 49 se muestran los valores de la ETP determinada para la unidad hidrográfica del río Ayaviri.

Figura 55

Determinación de la ETP en la unidad hidrográfica del río Ayaviri con el software

Hydraccess

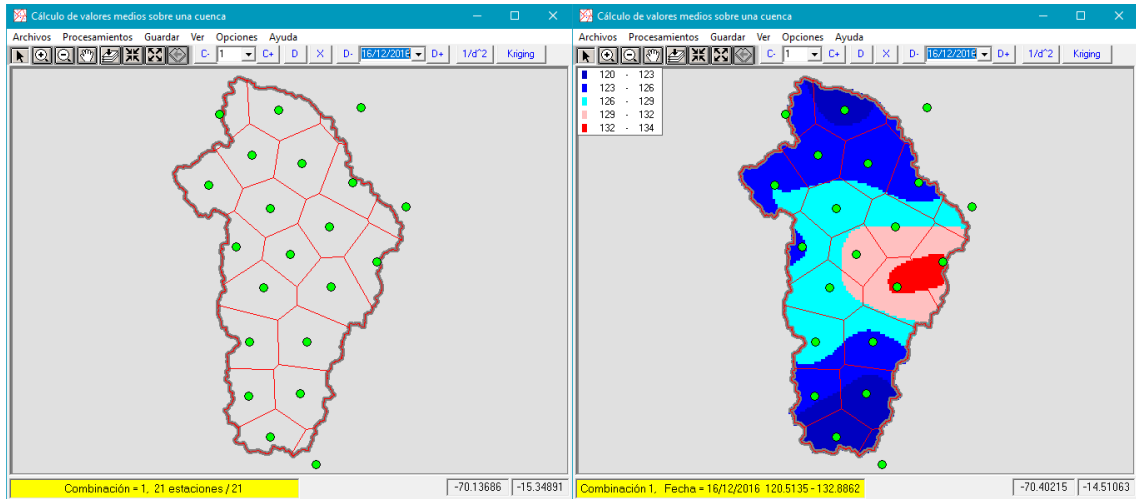


Tabla 49

Evapotranspiración mensual de la unidad hidrográfica del río Ayaviri

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1981	104.9	89.3	100.5	87.9	86.9	75.7	81.5	89.4	101.8	119.7	125.6	118.0	1181.2
1982	101.8	96.1	97.8	91.0	87.0	75.5	83.2	94.3	106.0	119.9	118.2	125.1	1196.0
1983	125.3	104.7	112.2	97.7	91.7	77.4	85.2	97.6	108.2	127.3	130.8	119.3	1277.4
1984	93.7	85.0	93.1	88.1	88.1	74.1	79.5	92.6	109.6	116.2	115.5	112.6	1148.2
1985	106.4	87.2	101.2	84.6	84.6	71.2	77.5	96.3	106.2	128.4	115.1	109.1	1168.0
1986	103.7	84.3	93.4	87.2	82.8	76.8	76.0	93.5	106.8	125.6	125.9	113.6	1169.6
1987	102.8	103.5	108.9	96.5	88.8	76.2	82.4	100.3	115.3	128.7	125.1	127.9	1256.6
1988	106.7	102.2	97.5	87.2	85.2	76.7	81.4	102.0	111.2	128.9	129.4	116.9	1225.4
1989	105.0	87.2	92.6	85.9	84.7	74.5	78.5	91.9	110.4	125.5	126.2	127.2	1189.7
1990	107.5	101.0	109.4	95.8	88.2	70.1	78.0	94.4	110.5	121.6	119.9	116.2	1212.7
1991	113.3	99.9	98.6	91.8	89.2	75.2	80.7	97.7	107.2	124.3	123.3	122.7	1223.9
1992	110.1	101.3	110.0	100.4	94.1	75.4	78.7	88.9	108.7	121.5	122.7	120.2	1232.0
1993	103.4	95.6	96.5	88.5	87.5	76.9	81.0	92.1	106.8	120.8	119.6	114.5	1183.2
1994	104.8	90.9	98.8	87.2	87.0	75.0	81.8	97.6	109.9	128.2	123.4	119.9	1204.6
1995	113.4	102.0	96.9	95.7	90.7	77.1	83.9	102.5	111.2	131.8	125.9	119.5	1250.7
1996	106.4	92.1	104.3	90.0	85.8	75.4	80.8	93.8	111.9	129.8	121.0	115.0	1206.3
1997	99.0	87.6	96.9	88.8	84.8	75.4	83.7	90.0	108.9	129.7	124.3	129.5	1198.6
1998	117.8	105.5	111.5	101.9	94.9	77.8	85.7	100.5	116.9	126.7	124.8	124.4	1288.4
1999	112.8	85.4	89.6	85.7	85.5	76.1	79.2	96.6	108.1	117.0	129.0	121.7	1186.7
2000	99.5	85.9	95.0	93.5	89.5	74.4	78.5	94.5	113.1	117.0	133.2	117.8	1192.1
2001	95.8	86.3	92.8	89.1	84.5	75.5	79.6	93.6	110.8	126.9	130.1	124.6	1189.4
2002	117.8	88.1	97.1	85.6	84.6	75.4	73.2	93.4	106.9	120.1	122.7	120.2	1185.1
2003	112.2	97.9	96.9	91.7	86.5	77.3	81.3	93.6	108.1	130.9	133.3	125.2	1234.9
2004	104.1	97.8	107.2	93.9	89.2	74.4	77.9	90.9	107.8	128.6	130.9	125.9	1228.7
2005	115.7	95.9	107.4	96.7	92.3	78.8	84.1	99.3	108.9	123.3	126.9	119.5	1248.9
2006	104.1	99.3	100.7	91.0	89.1	77.1	83.3	97.7	112.6	127.4	122.1	125.1	1229.4
2007	117.7	99.8	97.1	90.7	87.2	80.3	79.9	100.1	106.4	128.3	128.2	122.9	1238.5
2008	100.3	97.8	102.7	96.4	88.4	79.0	84.1	99.8	115.8	126.4	133.3	117.0	1241.1
2009	113.2	94.6	103.0	93.9	89.0	79.1	81.8	99.9	115.6	135.3	125.2	123.4	1254.0
2010	112.5	101.9	109.3	99.2	90.7	82.4	87.1	103.7	119.1	130.9	135.4	118.0	1290.2
2011	114.2	86.1	98.0	92.2	89.6	78.9	81.3	99.8	110.1	128.1	134.2	118.7	1231.3
2012	108.0	89.2	101.0	87.1	88.7	77.2	84.4	99.9	115.0	131.0	130.8	111.6	1224.0
2013	110.8	94.6	105.9	100.5	89.4	75.0	81.6	96.9	115.8	126.0	131.7	116.6	1244.8
2014	111.0	104.9	109.9	95.6	90.1	84.0	83.1	96.2	106.6	125.8	132.4	126.0	1265.4
2015	109.8	97.4	102.6	85.8	86.9	82.0	84.7	99.3	114.8	129.9	133.9	128.5	1255.6
2016	128.8	102.7	116.7	97.4	93.4	79.8	85.5	100.4	117.7	126.0	132.6	126.2	1307.2
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	108.7	95.0	101.5	92.0	88.2	76.7	81.4	96.4	110.6	125.9	126.7	120.6	1223.9
DESV.STD	7.5	6.7	6.5	4.8	2.8	2.8	2.9	3.9	3.9	4.5	5.4	5.1	37.0
MIN	93.7	84.3	89.6	84.6	82.8	70.1	73.2	88.9	101.8	116.2	115.1	109.1	1148.2
MAX	128.8	105.5	116.7	101.9	94.9	84.0	87.1	103.7	119.1	135.3	135.4	129.5	1307.2
MEDIANA	107.8	96.0	100.6	91.4	88.3	76.5	81.5	96.8	110.0	126.8	126.1	120.0	1227.0

4.3.2.2 Proceso de calibración del modelo hidrológico GR2M

Para la calibración del modelo hidrológico GR2M en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se consideró el periodo de los años 1981-2004. Las

variables de ingreso al modelo son: precipitación media mensual areal (ítem 4.2), evapotranspiración potencial y caudales observados en lámina.

Aplicando el algoritmo del método GR2M descrito en el ítem 2.8.2, se elaboró una hoja de cálculo, empleando la función solver incorporado dentro del programa Excel, se obtuvieron los parámetros del modelo X1 y X2, los cuales son la capacidad de producción y el parámetro de intercambio respectivamente, para la primera corrida se tiene $X1=5.44$ y $X2=0.85$. Los resultados obtenidos en la etapa de calibración, se muestran en la tabla 50, donde se observan los valores optimizados para los parámetros mencionados, así mismo los mejores valores encontrados para el criterio de Nash y el balance de caudales observados/simulados.

Tabla 50

Proceso de calibración del modelo hidrológico GR2M

Nom du bassin		Unidad Hidrografica Ayaviri	
Superficie du bassin (km ²)			3711.18
Paramètres modèle		Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)		5.44	231.56
x2: Paramètre d'échange (mm)		0.85	0.85
Valeurs initiales			
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)			115.78
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)			35
Période			
Longueur de la période de mise en route (mois)			12
Durée de la période test (mois)			275
Date de départ			01/1982
Date de fin			12/2004
Moyenne des pluies observées (mm/mois)			65.0
Moyenne des ETP observées (mm/mois)			100.8
Moyenne des débits observés (mm/mois)			16.3
Moyenne des racines des débits observés			3.3
Moyenne des log des débits observés			2.0
Critères d'efficacité (%)			
Nash(Q)			59.3
Nash(VQ)			66.3
Nash(ln(Q))			53.7
Bilan			84.6

Los resultados obtenidos del modelo GR2M, en el proceso de calibración con la optimización del programa solver, se obtuvo el criterio de Nash de 59.3%, el cual representa un valor bueno y con el criterio de balance (caudal observado/caudal simulado) se obtuvo 84.6%. Valor que indica que el modelo represento adecuadamente los caudales de esta unidad hidrográfica.

Así mismo, en forma gráfica (figura 56), se observa que los caudales simulados, respecto a los caudales observados, guarda una buena correlación, sin embargo, se observa algunos resultados no muy satisfactorios en cinco periodos muy pronunciados: 1981, 1989, 1993 y 1995 donde los caudales simulados subestiman a los caudales observados, y en el año 1984 los caudales simulados sobreestiman los caudales observados, en general se puede definir que los caudales simulados tienen una buena correlación.

Como podemos observar en la figura 57, se aprecia una correlación R^2 igual a 0.6399 entre los caudales observados con los simulados, la cual es un valor que nos indica que el modelo se ajusta.

Figura 56

Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso calibración modelo GR2M

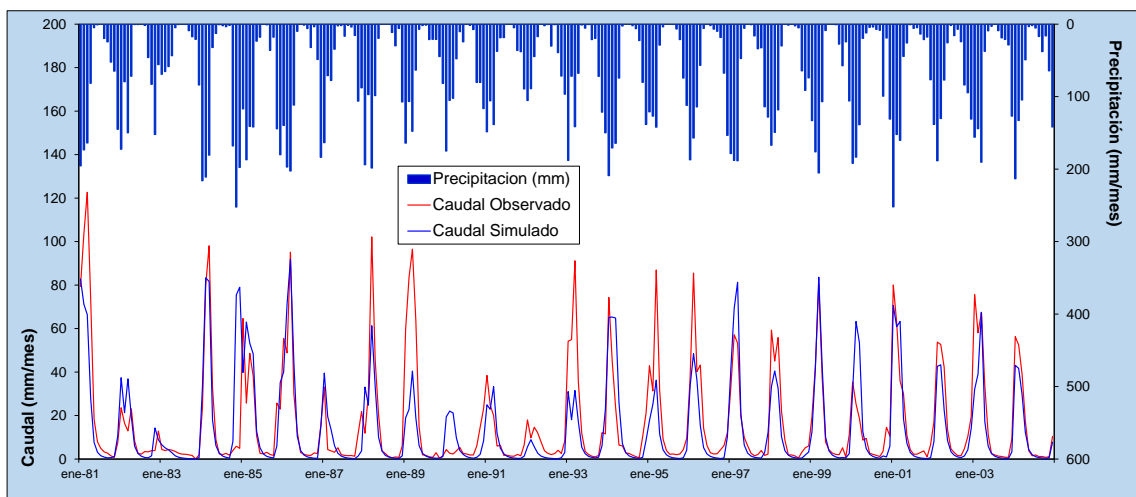
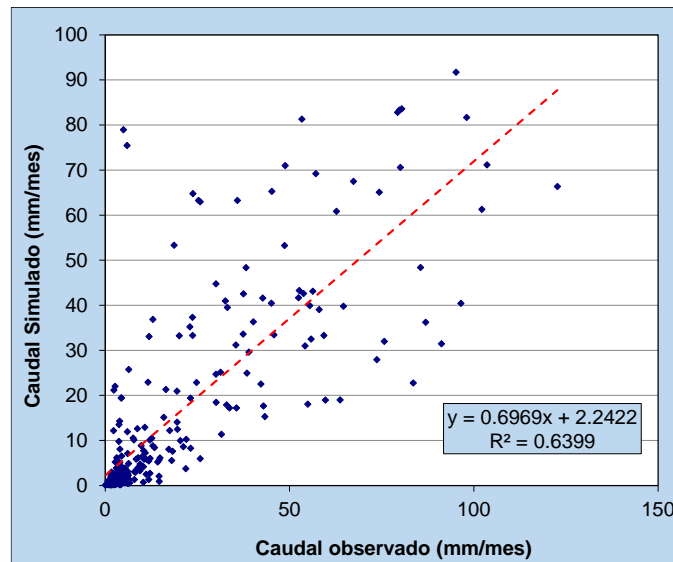


Figura 57

Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo

GR2M



4.3.2.3 Proceso de validación del modelo hidrológico GR2M

Para el proceso de validación del modelo se consideró el periodo de los años 2005-2016. Para esta etapa, el modelo se aplicó con los parámetros X1 y X2 obtenidos previamente en la etapa de calibración, cuyos resultados se presentan en la tabla 51.

Tabla 51

Proceso de validación del modelo hidrológico GR2M

Nom du bassin		Unidad Hidrografica Ayaviri	
Superficie du bassin (km ²)		3711.18	
Paramètres modèle		Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)		5.44	231.56
x2: Paramètre d'échange (mm)		0.85	0.85
Valeurs initiales			
Niveau de remplissage initial S0 (max.: x1 mm)		115.78	
Niveau de remplissage initial R0 (max.: 60 mm)		35	
Période			
Longueur de la période de mise en route (mois)		12	
Durée de la période test (mois)		131	
Date de départ		01/2006	
Date de fin		12/2016	
Moyenne des pluies observées (mm/mois)		64.5	
Moyenne des ETP observées (mm/mois)		104.2	
Moyenne des débits observés (mm/mois)		15.7	
Moyenne des racines des débits observés		3.1	
Moyenne des log des débits observés		1.9	
Critères d'efficacité (%)			
Nash(Q)		71.3	
Nash(VQ)		75.2	
Nash(ln(Q))		62.7	
Bilan		83.3	

En el proceso de validación se obtuvo 71.3 % para el criterio de Nash y para el Balance 83.3 %, asimismo en la figura 59 se aprecia el coeficiente de correlación R^2 es 0.723, destacando que todos estos valores son buenos.

Así mismo, en forma gráfica (figura 58), se visualiza que los caudales simulados, respecto a los observados, guarda una buena correlación, sin embargo, se observa algunos resultados no muy satisfactorios en dos periodos muy pronunciados: 2009 y 2014 donde los caudales simulados subestiman a los caudales observados, en general se puede definir que los caudales simulados tienen una buena correlación.

Figura 58

Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo

GR2M

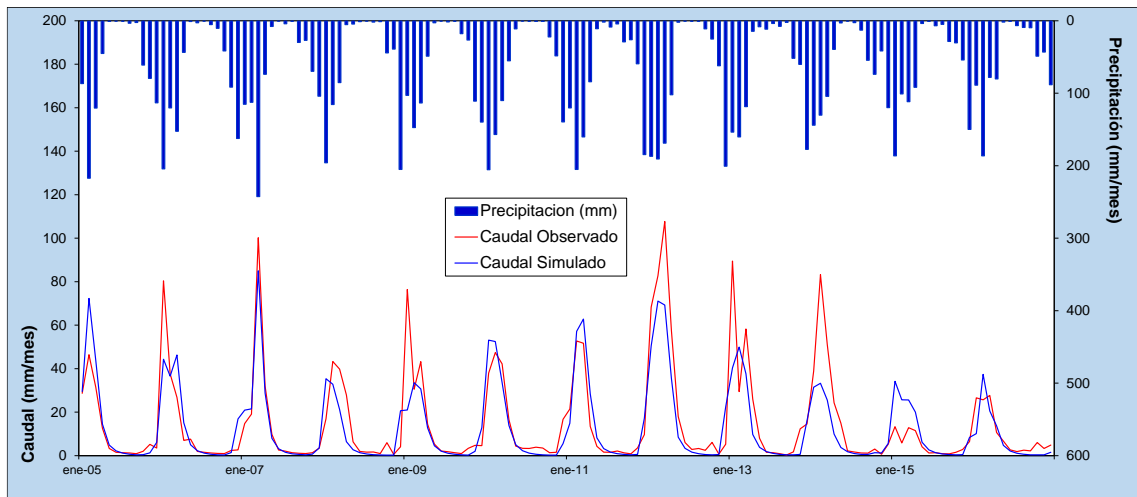


Figura 59

Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo

GR2M

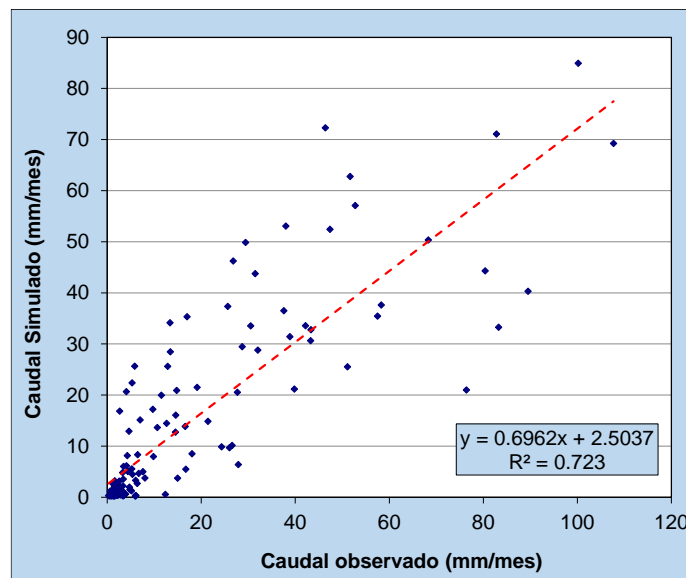


Tabla 52

Descargas medias mensuales generados (m^3/s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri con GR2M

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
1981	114.76	109.18	91.95	39.99	10.57	4.40	2.08	1.18	0.79	0.85	1.55	14.61	32.66
1982	51.74	32.72	51.08	27.78	8.12	3.59	1.75	0.97	0.77	2.06	20.47	12.21	17.77
1983	9.07	7.82	5.85	4.17	2.04	1.15	0.65	0.40	0.26	0.17	0.13	0.75	2.71
1984	46.16	127.84	113.19	25.61	8.54	3.74	1.82	1.01	0.61	11.23	108.05	109.43	46.44
1985	55.12	96.59	73.80	69.25	17.89	7.50	3.19	1.63	1.11	0.69	8.56	48.81	32.01
1986	55.35	108.93	127.08	64.08	14.57	5.54	2.51	1.35	0.91	0.53	0.51	20.98	33.53
1987	54.79	29.85	18.73	8.82	3.65	1.89	1.05	0.62	0.39	0.25	1.92	5.21	10.60
1988	45.84	37.92	84.95	47.89	13.80	5.33	2.43	1.29	0.77	0.50	0.33	2.05	20.26
1989	26.30	34.94	56.01	27.19	8.52	3.76	1.83	1.07	0.71	0.46	0.47	1.58	13.57
1990	26.91	33.78	29.34	14.05	5.45	2.99	1.50	0.85	0.53	1.05	2.99	11.49	10.91
1991	34.58	35.08	46.06	17.12	6.78	3.47	1.70	0.95	0.58	0.41	0.39	1.83	12.41
1992	7.72	13.60	7.84	3.89	1.88	1.07	0.61	0.41	0.27	0.23	0.80	4.10	3.54
1993	42.95	27.69	43.62	24.64	7.56	3.47	1.71	1.00	0.66	1.17	8.66	31.78	16.24
1994	90.17	100.16	89.77	36.87	9.86	4.16	1.98	1.09	0.66	0.41	1.07	11.97	29.01
1995	24.48	38.57	50.22	16.30	5.78	2.75	1.40	0.80	0.50	0.31	0.75	5.64	12.29
1996	46.58	74.25	50.35	21.93	7.25	3.29	1.63	0.92	0.57	0.36	0.65	14.00	18.48
1997	56.76	106.17	112.65	29.99	8.90	3.85	1.86	1.06	0.77	0.59	4.28	16.90	28.65
1998	46.17	62.09	45.05	14.71	5.26	2.55	1.31	0.75	0.47	0.58	2.64	4.43	15.50
1999	17.31	63.86	115.82	60.93	14.05	5.40	2.45	1.30	0.83	0.92	0.71	3.46	23.92
2000	43.21	97.07	73.91	18.06	6.59	3.09	1.56	0.89	0.55	1.91	1.33	8.11	21.36
2001	97.82	93.35	87.65	26.44	10.06	4.24	2.05	1.13	0.69	0.44	0.30	0.79	27.08
2002	11.18	65.37	60.00	32.24	11.69	4.78	2.39	1.31	0.86	1.92	6.00	19.51	18.10
2003	44.34	59.93	93.54	24.67	8.04	3.60	1.76	0.99	0.63	0.40	0.31	4.55	20.23
2004	59.74	63.93	41.02	17.52	6.07	2.87	1.46	0.86	0.69	0.45	0.76	10.72	17.17
2005	40.84	110.93	60.65	20.73	6.69	3.08	1.54	0.87	0.54	0.57	1.81	8.39	21.39
2006	61.40	55.99	64.09	21.70	6.93	3.20	1.59	0.90	0.56	0.44	1.96	23.38	20.18
2007	28.99	33.00	117.71	41.24	11.05	4.53	2.14	1.16	0.76	0.52	1.01	4.93	20.59
2008	48.98	50.30	29.35	9.17	3.77	1.94	1.03	0.61	0.39	0.31	0.34	28.63	14.57
2009	29.10	51.45	42.49	18.26	6.23	2.92	1.47	0.83	0.53	0.35	2.83	17.93	14.53
2010	73.56	80.45	46.52	19.85	6.99	3.19	1.59	0.89	0.55	0.34	0.37	7.60	20.16
2011	20.59	87.61	86.98	40.77	11.30	4.64	2.22	1.21	0.80	0.54	0.77	23.86	23.44
2012	69.78	109.06	95.94	50.76	11.79	4.75	2.21	1.19	0.72	0.45	0.68	31.04	31.53
2013	55.88	76.53	52.14	13.90	5.25	2.63	1.35	0.78	0.49	0.45	0.82	22.29	19.38
2014	43.54	51.05	35.38	14.16	5.20	2.52	1.30	0.76	0.77	1.82	1.75	7.71	13.83
2015	47.32	39.36	35.50	28.59	8.54	3.74	1.84	1.02	0.68	0.49	0.65	11.57	14.94
2016	14.06	57.32	28.46	19.56	6.50	3.02	1.53	0.87	0.54	0.49	0.55	2.10	11.25
Prom.	45.64	64.55	62.91	27.02	8.14	3.57	1.74	0.97	0.64	0.96	5.20	15.40	19.73

4.3.3 Aplicación del modelo hidrológico de abcd

En la aplicación del modelo hidrológico abcd, se desarrolló el proceso de calibración y validación, con el propósito de asegurar que el modelo trabaje

satisfactoriamente para un escenario futuro, por ello según la metodología descrita en el acápite 3.5.7 se presenta el desarrollo del modelo.

4.3.3.1 Calibración

En el proceso de calibración se utilizó datos del periodo de los años 1981-2004 y para la optimización del modelo se utilizó la función solver, la que se encuentra incorporado dentro del programa Excel, obteniéndose en el criterio de Nash de 60.0 %, el cual representa un valor bueno, que indica que el modelo represento adecuadamente los caudales del río Ayaviri. Los resultados obtenidos de los parámetros del modelo hidrológico se muestran en la tabla 53.

Tabla 53

Parámetros del modelo hidrológico abcd – calibración

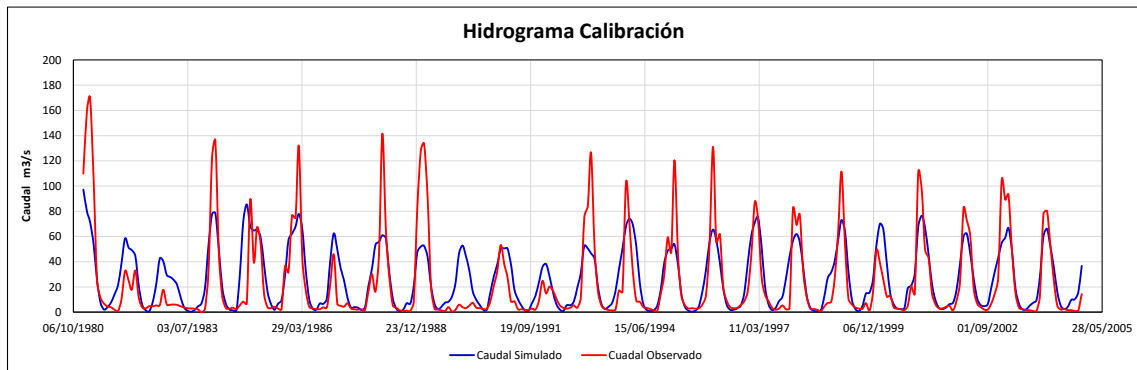
Pámetros del Modelo Hidrológico	
a	0.1194
b	0.8132
c	0.7423
d	0.0000
Valores Iniciales	
Agua Subterr. Inicial	60 mm
Datos	
Area de la cuenca	3711.18 Km ²
Factor de conversión	0.000385802
Promedio observado	24.31 m ³ /s
Parametro de calibración	
Nash	0.60

En el hidrograma de calibración que se muestra en la figura 60, se puede observar que se presentan 7 periodos no satisfactorios que son de los años 1981, 1988, 1989, 1993, 1995 y 1996 donde los caudales simulados subestiman a los caudales observados, y el año 1984 los caudales simulados sobreestiman los

caudales observados, en general se puede definir que los caudales simulados tienen una buena correlación.

Figura 60

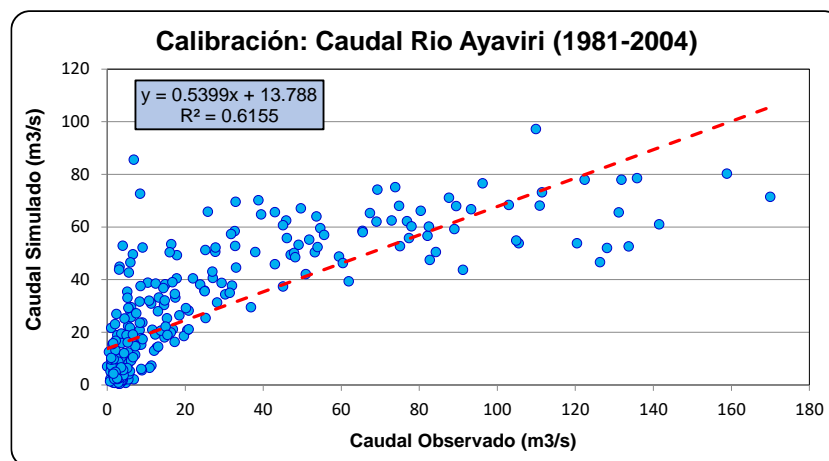
Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso calibración modelo abcd



En el proceso de calibración, se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.6155, el cual indica que existe una correlación buena, resultado que el modelo es aceptable, generando una ecuación de la forma $Q_{sim} = 0.5399 * Q_{obser} + 13.788$, conforme se puede apreciar en la figura 61.

Figura 61

Correlación entre los caudales observados y simulados proceso calibración modelo abcd



4.3.3.2 Validación

Para el proceso de validación del modelo se consideró el periodo de los años 2005-2016. Para esta etapa, el modelo se corrió con los parámetros a, b, c y d obtenidos previamente en la etapa de calibración, obteniéndose en el criterio de Nash de 58.0%, el cual representa un valor bueno, concluyendo que el modelo representa adecuadamente los caudales del río Ayaviri, los parámetros y resultados obtenidos se muestran en la tabla 54.

Tabla 54

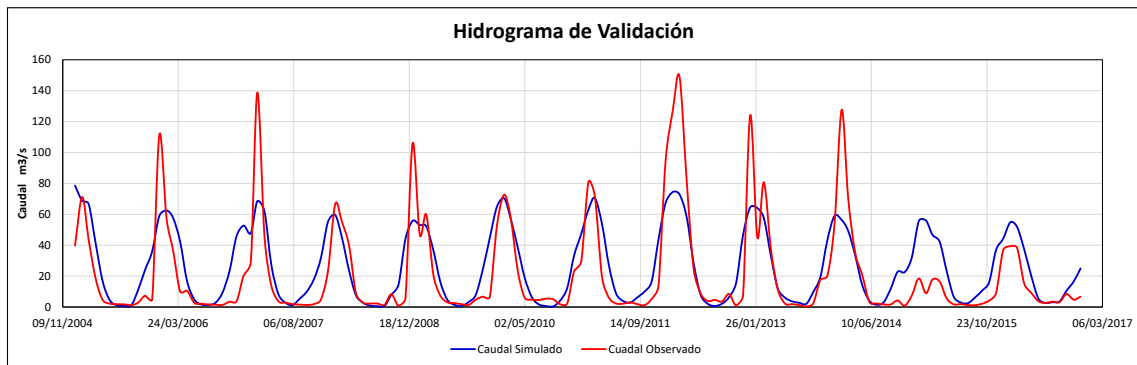
Parámetros del modelo hidrológico abcd – validación

Pámetros del Modelo Hidrologico	
a	0.1194
b	0.8132
c	0.7423
d	0.0000
Valores Iniciales	
Agua Subterr. Inicial	60 mm
Datos	
Area de la cuenca	3711.18 Km ²
Factor de conversión	0.000385802
Promedio observado	21.78 m ³ /s
Parámetro de validación	
Nash	0.58

En el hidrograma de validación que se muestra en la figura 62, se puede observar que se presentan 3 periodos no satisfactorios que son de los años 2007, 2012 y 2014 donde los caudales simulados subestiman a los caudales observados, en general se puede definir que los caudales simulados tienen una buena correlación.

Figura 62

*Hidrograma de caudales simulados vs caudales observados proceso validación modelo
abcd*



En el proceso de validación, se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 es de 0.6007, teniendo una correlación buena, resultado aceptable generando una ecuación de la forma $Q_{sim} = 0.5681 \cdot Q_{obser} + 14.232$, conforme se puede apreciar en la figura 63.

Figura 63

*Correlación entre los caudales observados y simulados proceso validación modelo
abcd*

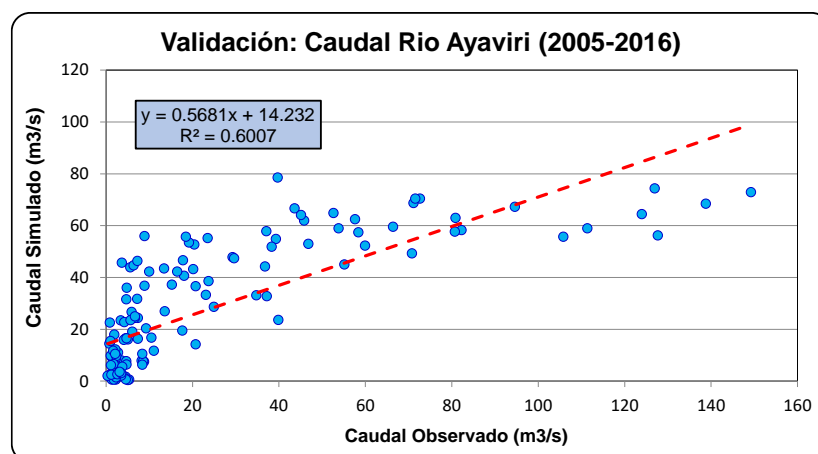


Tabla 55

*Descargas medias mensuales generados (m^3/s) – Unidad hidrográfica del río Ayaviri
con abcd*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
1981	97.21	80.30	71.41	53.80	25.38	7.37	2.09	3.97	7.79	14.16	21.60	38.85	35.33
1982	58.47	51.24	49.24	44.58	20.98	5.59	1.58	0.76	8.31	22.36	42.66	40.46	28.85
1983	29.54	27.85	25.75	21.76	12.18	3.90	1.15	0.42	1.69	4.58	7.05	18.91	12.90
1984	52.77	77.91	78.57	49.42	19.14	6.75	2.25	1.48	1.16	29.26	72.66	85.54	39.74
1985	67.91	64.80	65.31	59.54	37.93	15.92	6.50	1.89	6.81	9.57	29.50	57.30	35.25
1986	62.23	68.02	77.94	65.67	33.21	9.86	2.81	1.98	6.84	6.60	10.50	40.48	32.18
1987	62.42	49.65	35.39	25.21	11.45	3.62	4.05	3.52	1.81	3.68	21.14	34.35	21.36
1988	53.51	55.79	61.01	58.53	31.33	10.65	2.81	0.81	2.17	7.17	6.79	20.89	25.96
1989	47.51	51.98	52.60	43.73	20.78	6.60	2.19	4.41	7.52	8.30	12.56	23.08	23.44
1990	46.56	52.89	44.88	33.12	16.55	9.79	5.77	1.83	1.97	15.23	28.21	37.72	24.54
1991	50.35	50.51	50.55	37.59	17.81	10.21	5.15	1.48	1.28	7.19	13.14	23.68	22.41
1992	35.83	38.25	29.16	16.31	6.50	2.10	0.95	5.50	5.53	8.25	19.50	30.90	16.57
1993	52.71	50.47	46.62	42.13	19.94	6.23	2.43	4.35	7.30	16.80	34.54	50.42	27.83
1994	68.35	74.15	69.55	52.17	23.65	6.48	1.77	0.88	1.60	5.13	18.02	38.79	30.05
1995	48.79	50.10	53.79	37.40	14.07	4.14	1.17	0.45	1.32	4.86	16.76	33.22	22.17
1996	55.21	65.57	56.98	39.34	18.57	5.57	1.81	1.93	3.08	5.22	15.29	38.98	25.63
1997	60.64	71.13	75.16	52.15	20.64	6.09	1.74	3.33	8.81	12.32	26.95	43.78	31.90
1998	56.62	61.99	55.75	35.00	13.00	3.61	1.15	0.73	1.37	12.05	27.16	31.63	25.01
1999	40.63	58.03	73.11	64.01	32.02	9.45	2.53	0.86	5.06	14.73	15.49	25.31	28.43
2000	53.20	70.20	65.83	38.48	14.56	6.07	2.81	2.51	3.07	18.90	21.16	30.36	27.26
2001	68.07	76.57	67.07	45.88	22.11	9.24	3.50	2.52	3.64	6.37	7.49	17.40	27.49
2002	38.19	60.18	62.43	46.31	26.45	10.52	5.67	4.76	6.30	19.15	32.12	43.05	29.60
2003	54.88	59.21	66.71	48.55	19.00	6.63	2.18	2.17	4.99	7.37	9.59	27.94	25.77
2004	60.26	66.16	52.34	35.61	16.19	4.95	2.44	4.23	9.78	10.26	15.79	36.76	26.23
2005	78.60	68.75	66.73	40.68	16.52	4.37	1.21	0.94	1.11	11.05	24.43	36.05	29.20
2006	59.02	62.51	57.91	42.32	16.79	4.97	1.71	1.39	2.82	9.20	23.48	45.77	27.32
2007	52.72	47.89	68.53	62.02	26.99	8.02	2.80	1.34	5.49	9.94	18.02	31.57	27.94
2008	55.25	59.63	45.06	23.68	7.57	2.77	0.93	0.60	0.62	7.90	14.51	43.90	21.87
2009	55.74	53.01	52.33	36.69	16.34	4.60	1.49	0.67	3.28	7.75	24.42	44.67	25.08
2010	64.92	70.44	57.48	38.64	19.10	6.43	1.76	0.67	0.44	4.04	12.25	33.35	25.80
2011	47.41	63.00	70.47	53.54	26.70	8.65	3.96	2.90	6.29	9.90	16.11	43.47	29.37
2012	67.31	74.41	72.97	58.33	28.73	7.73	2.12	0.70	2.16	6.34	15.55	46.43	31.90
2013	64.49	64.10	57.72	32.83	11.77	6.08	3.72	2.78	2.11	9.70	19.56	43.24	26.51
2014	58.98	56.29	49.35	33.12	14.22	4.10	1.53	2.95	11.77	22.78	22.65	31.76	25.79
2015	55.73	56.01	46.72	42.32	23.55	6.66	2.97	2.51	6.17	10.54	15.97	36.82	25.50
2016	44.28	54.88	51.87	37.29	20.43	5.61	2.68	3.14	3.67	10.57	16.51	25.00	22.99
Prom.	56.29	60.11	57.90	42.99	20.06	6.70	2.59	2.15	4.31	10.81	20.81	37.00	26.81

4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES SIMULADOS

4.4.1 Análisis comparativo de modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd

En esta parte se muestran las comparaciones realizadas de los tres modelos hidrológicos utilizados en la presente investigación, para la etapa de calibrados y validados, efectuando comparaciones cualitativas y cuantitativas mediante gráficas y cuadros, en los cuales se presentan la respuesta que tiene cada modelo, mediante indicadores estadísticos de eficiencia.

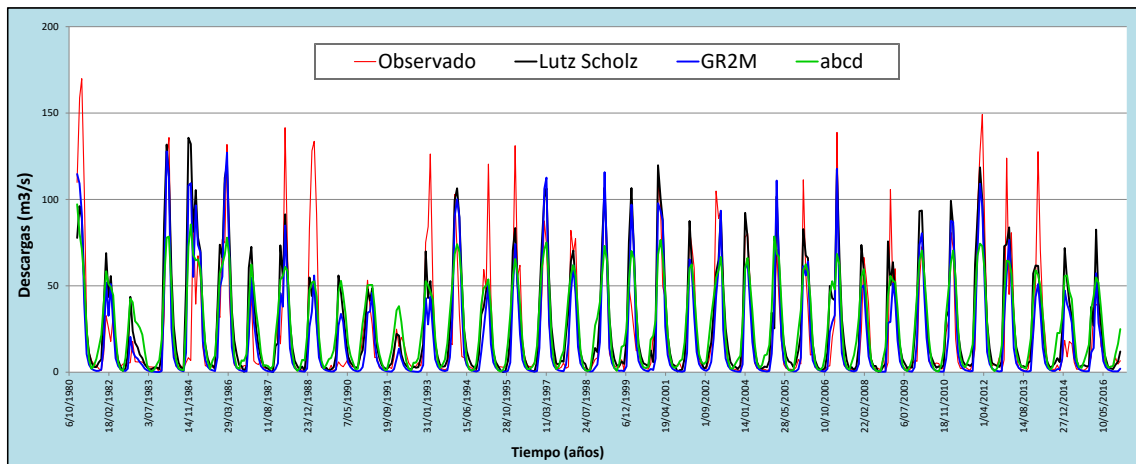
En acápites anteriores se analizaron la respuesta de los 03 modelos hidrológicos de manera independiente, así mismo la respuesta de sus parámetros, por ello en esta parte se analizara una respuesta en conjunto, para lo cual se elaboró gráficas de comparación con los dos enfoques de modelamiento (calibración y validación), es decir se elaboró la comparación de los hidrogramas de caudales simulados con información de caudales observados de la estación Puente Ayaviri, ya que los registros de esta estación representan la escorrentía en la unidad hidrográfica de estudio.

En la figura 64, se observa que los tres modelos lluvia-escorrentía muestran desempeños similares en relación con la serie observada, sin embargo, cabe mencionar que durante el periodo de tiempo analizado se ha detectado valores extremos en la serie de caudales observados y que no han podido ser simulados apropiadamente por los modelos hidrológicos, esto se debe a que los modelos en estudio son modelos agregados y solo utilizan pocos parámetros para su aplicación, sin embargo el modelo hidrológico más eficiente que se puede observar es el GR2M.

Figura 64

Comparación de hidrogramas de los modelos con la estación hidrológica Puente

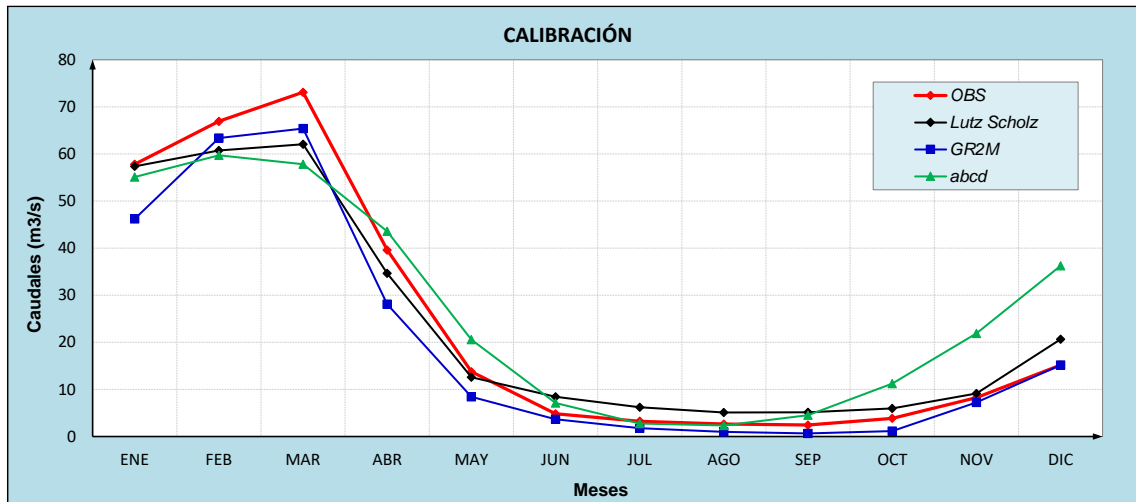
Ayaviri



En la figura 65, se muestra la comparación de los caudales simulados a nivel multimensual, con respecto a la estación hidrométrica puente Ayaviri, donde se visualiza la respuesta de los modelos en la calibración es similar, pero con mejor ajuste del modelo de Lutz Scholz y GR2M, por lo tanto, es aceptable tanto para caudales de avenida (diciembre-abril) y de estiaje (mayo-noviembre), mientras que el modelo abcd sobrestima los caudales simulados en los meses de octubre-diciembre.

Figura 65

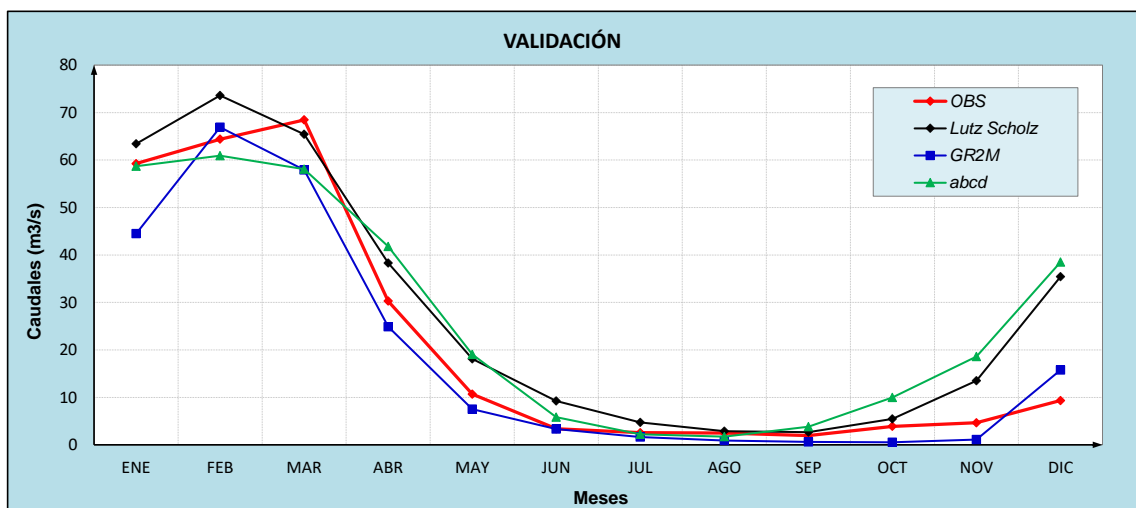
Comparación de las series simuladas y observadas multimensuales – Calibración



En la figura 66, se muestra la comparación de los caudales simulados a nivel multimensual, con respecto a la estación hidrométrica puente Ayaviri, donde se visualiza la respuesta de los modelos en la validación es similar, pero con mejor ajuste del modelo de GR2M, mientras que el modelo Lutz Scholz y abcd sobrestima los caudales simulados en los meses de abril-junio y octubre-diciembre.

Figura 66

Comparación de las series simuladas y observadas multimensuales – Validación



La tabla 52 muestra los registros multimensuales de los caudales simulados por el modelo Lutz Scholz, GR2M y abcd, así como los caudales observados de la estación Puente Ayaviri. En la etapa de calibración se muestra, que en el modelo Lutz Scholz el mes de enero es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 0.8%, mientras que el mes que más se aleja a lo observado es en setiembre. Asimismo, se observa que en el modelo GR2M el mes de diciembre es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 0.2%, mientras que el mes que más se aleja a lo observado es en setiembre. Finalmente, se muestra que en el modelo abcd el mes de enero es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 4.7%, mientras que el mes que más se aleja a lo observado es en octubre. Además, se puede observar en la etapa de calibración que el caudal simulado es subestimado en 24.02 m³/s para el modelo Lutz Scholz, también subestimado en 20.19 m³/s para el modelo GR2M, mientras es sobrestimado en 26.91 m³/s para el modelo abcd; asimismo se estima el promedio de los tres modelos que es de 23.70 m³/s, en comparación con el caudal observado de 24.31 m³/s, por consiguiente, se observa un buen comportamiento del promedio anual.

De la tabla 56, para la etapa de validación se observa, que en el modelo Lutz Scholz el mes de marzo es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 4.4%, mientras que el mes que más aleja a lo observado es en diciembre. Igualmente se observa que en el modelo GR2M el mes de junio es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 1.4%, mientras que el mes que más se aleja a lo observado es en octubre. Finalmente, se observa que en el modelo abcd el mes de enero es el que mejor se aproxima a lo observado con un error de 0.9%, mientras que el mes que más se aleja a lo observado es en diciembre. También, se

observa en la etapa de validación que el caudal simulado es sobrestimado en 27.73 m³/s para el modelo Lutz Scholz, subestimado en 18.82 m³/s para el modelo GR2M, y sobrestimado en 26.61 m³/s para el modelo abcd; además se estima el promedio de los tres modelos es de 24.39 m³/s, en comparación con el caudal observado de 21.78 m³/s, por consiguiente, se observa un buen comportamiento del promedio anual.

Según la tabla 56 se puede concluir, que el comportamiento de los tres modelos evaluados, se aproximan mejor en los meses de estiaje. Asimismo, el modelo más representativo es el GR2M que el Lutz Scholz y abcd mostrándose mayor acercamiento a los caudales observados de la estación Puente Ayaviri.

Tabla 56

Caudales mensuales simulados y observados de los modelos hidrológicos

MES	CALIBRACIÓN				VALIDACIÓN			
	Lutz Scholz (m ³ /s)	GR2M (m ³ /s)	abcd (m ³ /s)	OBS (m ³ /s)	Lutz Scholz (m ³ /s)	GR2M (m ³ /s)	abcd (m ³ /s)	OBS (m ³ /s)
ENE	57.36	46.21	55.08	57.81	63.44	44.50	58.71	59.24
FEB	60.75	63.36	59.71	66.93	73.59	66.92	60.91	64.41
MAR	62.07	65.40	57.80	73.09	65.45	57.93	58.10	68.45
ABR	34.65	28.09	43.60	39.59	38.32	24.89	41.79	30.28
MAY	12.61	8.46	20.56	13.75	18.10	7.52	19.06	10.70
JUN	8.45	3.69	7.14	4.84	9.24	3.35	5.83	3.40
JUL	6.24	1.78	2.77	3.26	4.72	1.65	2.24	2.56
AGO	5.13	0.99	2.37	2.65	2.89	0.92	1.72	2.48
SEP	5.15	0.65	4.55	2.44	2.69	0.61	3.83	1.97
OCT	5.96	1.16	11.23	3.88	5.45	0.56	9.98	3.90
NOV	9.16	7.23	21.90	8.27	13.50	1.13	18.62	4.65
DIC	20.65	15.20	36.24	15.18	35.42	15.79	38.50	9.33
PROM.	24.02	20.19	26.91	24.31	27.73	18.82	26.61	21.78

4.4.2 Eficiencia del modelo hidrológico Lutz Scholz, GR2M y abcd

Para conocer qué modelo de simulación de caudales medios mensuales es eficiente para la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se efectuó la prueba de bondad de ajuste de los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd, para la etapa de calibración y validación.

Las pruebas de bondad de ajuste utilizadas para ver la eficiencia que presenta cada modelo son: la eficiencia de Nash-Suttcliffe (E), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS), el coeficiente de calibración (r), criterio de Schultz (D) y la razón RMSE.

En la tabla 57 se observa el resumen comparativo de los indicadores estadísticos de eficiencia para los 03 modelos hidrológicos adecuados en el área de estudio. Al respecto se destaca el desempeño de los modelos agrupados, quienes presentan eficiencias en el rango de Nash [0.59-0.97] y Nash [0.58- 0.71] para la etapa de calibración y validación.

El modelo Lutz Scholz y abcd presentan los mejores desempeños con eficiencias de Nash de 0.97 y 0.60 para la etapa de calibración, mientras que las eficiencias disminuyen en la etapa de validación con Nash de 0.58 para ambos modelos. Por otro lado, el modelo GR2M presenta una eficiencia de Nash de 0.59 para la etapa de calibración, y esta se incrementa a 0.71 para la etapa de validación, por lo que este modelo presenta un muy buen desempeño.

Para el caso del indicador PBIAS que se encuentra en %, en el proceso de calibración el modelo Lutz Scholz es muy bueno pues es <10%, el modelo GR2M es satisfactorio pues esta entre 15% y 25% y el modelo abcd es bueno pues esta entre 10% y 15%; luego se observa en el proceso de validación que el modelo

GR2M es bueno pues esta entre 10% y 15%, y los modelos Lutz Scholz y abcd son satisfactorios pues están entre 15% y 25%.

Finalmente, se deduce que en el área de estudio de la unidad hidrográfica del río Ayaviri, los modelos utilizados son aceptables, y que entre ellos destaca el modelo GR2M.

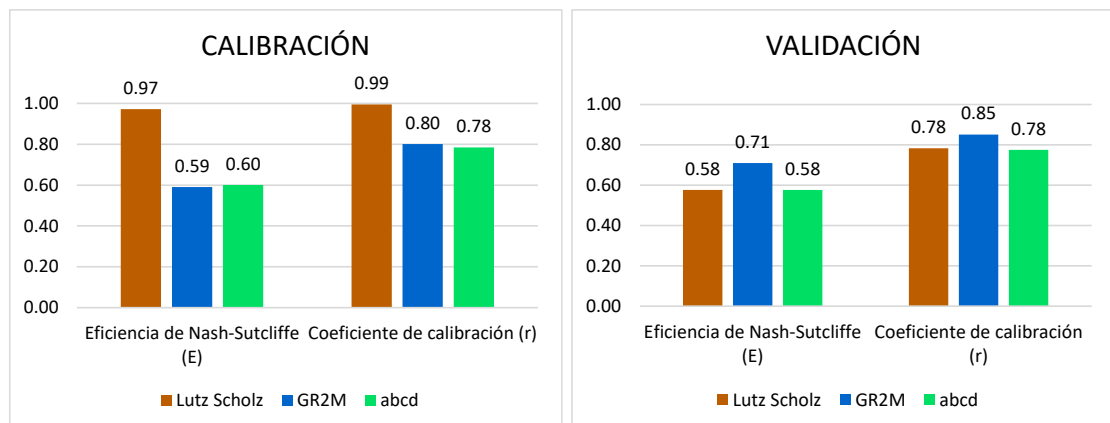
Tabla 57

Resumen indicadores estadísticos de eficiencia

Proceso	Parámetros Estadísticos		Modelos Hidrológicos		
			Lutz Scholz	GR2M	abcd
Calibración	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	E	0.97	0.59	0.60
	Coefficiente de calibración	r	0.99	0.80	0.78
	Criterio de Schultz	D	4.28	4.63	4.91
	Raíz del error cuadrático medio	RMSE	4.36	21.20	21.81
	Porcentaje de sesgo	PBIAS	-2.34	16.96	- 10.71
	Razón RMSE- desviación estándar de las observaciones	RSR	0.16	0.61	0.63
Validación	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	E	0.58	0.71	0.58
	Coefficiente de calibración	r	0.78	0.85	0.78
	Criterio de Schultz	D	4.06	5.01	5.45
	Raíz del error cuadrático medio	RMSE	21.95	17.06	20.82
	Porcentaje de sesgo	PBIAS	-18.19	13.61	- 22.16
	Razón RMSE- desviación estándar de las observaciones	RSR	0.65	0.53	0.65

Figura 67

Comparación de los modelos e indicadores estadísticos de eficiencia





V. CONCLUSIONES

- La eficiencia del modelo hidrológico Lutz Scholz, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se obtuvo con los indicadores estadísticos, en relación a las etapas de calibración y validación se obtuvo estadísticos de Nash (0.97, 0.58), coeficiente de calibración (0.99, 0.78), criterio de Schultz (4.28, 4.06), RMSE (4.36, 21.95), PBIAS (-2.34, -18.19) y RSR (0.16, 0.65) representando así un ajuste “bueno”.
- La eficiencia del modelo hidrológico GR2M, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se obtuvo con los indicadores estadísticos, en relación a las etapas de calibración y validación se obtuvo estadísticos de Nash (0.59, 0.71), coeficiente de calibración (0.80, 0.85), criterio de Schultz (4.63, 5.01), RMSE (21.20, 17.06), PBIAS (16.96, 13.61) y RSR (0.61, 0.53) representando así un ajuste “muy bueno”.
- La eficiencia del modelo hidrológico abcd, en la determinación del caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri, se obtuvo con los indicadores estadísticos, en relación a las etapas de calibración y validación se obtuvo estadísticos de Nash (0.60, 0.58), coeficiente de calibración (0.78, 0.78), criterio de Schultz (4.91, 5.45), RMSE (21.81, 20.82), PBIAS (-10.71, -22.16) y RSR (0.63, 0.65) representando así un ajuste “bueno”.
- Los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd son eficientes en el orden que $GR2M > Lutz\ Scholz > abcd$, esto según el análisis de eficiencia realizado mediante indicadores estadísticos; por lo tanto, el modelo hidrológico que mejor se ajusta para la determinación de caudales medios mensuales en la unidad hidrográfica del río Ayaviri es el modelo hidrológico GR2M.



VI. RECOMENDACIONES

Concluido el presente trabajo de investigación sobre el análisis comparativo de los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd para estimar el caudal medio mensual en la unidad hidrográfica del río Ayaviri; se recomienda lo siguiente:

- Realizar investigaciones sobre determinación de caudales medios mensuales empleando los modelos hidrológicos Lutz Scholz, GR2M y abcd, para otras unidades hidrográficas a nivel regional y nacional, obteniendo la eficiencia que presentan. Incentivar en la formación académica del Ingeniero Agrícola, utilizando los modelos matemáticos en los recursos hídricos, para fortalecer sus capacidades en el desarrollo de futuras investigaciones en la rama de los modelos matemáticos en recursos hídricos.
- Utilizar el modelo GR2M, para la generación de caudales mensuales en fuentes hídricas sin registro de caudales y/o puntos de interés, que se encuentran dentro de la unidad hidrográfica del río Ayaviri.
- El producto PISCO, es una información que se encuentra en forma gratuita y de libre acceso brindada por el SENAMHI, se recomienda que dicha información sea utilizada para futuras investigaciones y validada con datos observados en cuencas del altiplano peruano, donde se tiene escasa información meteorológica.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56*. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- ANA. (2010). *Evaluación de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Huancané y Suches*.
- ANA. (2019). *Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrográfica del Río Ramis: Vol. Volumen I* (Autoridad Nacional del Agua). Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos.
- Andino, M. (2019, abril 29). La Bitácora Verde: Ciclo hidrológico del agua. *La Bitácora Verde*. <https://blogbitacoraverde.blogspot.com/2019/04/ciclo-hidrologico-del-agua.html>
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (1era ed.). EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES.
- Arboleda, J., Felipe, O., Yerrén, J., & DHI/SPH. (2018). *Manual de Hidrometría Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)* (Dirección de Hidrología (DHI)). Subdirección de Predicción Hidrológica (SPH).
- Cabrera. (2017). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil*, 7.
- Cabrera, J. (2012a). *Modelo abcd – Simulación de caudales anuales* (Universidad Nacional de Ingeniería-Facultad de Ingeniería Civil).
- Cabrera, J. (2012b). *Modelos Hidrológicos* (Universidad Nacional de Ingeniería-Facultad de Ingeniería Civil).



- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (Tercera Reimpresión). Editorial Universitaria Potosina.
- Carmona Arteaga, A. (2019). Tendencias, validación y generación de caudales usando la data grillada pisco para las cuencas del río Biabo. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4214>
- Casas, L. (2002). *Evaluación hidrológica de la microcuenca Muylo –Tarma*. FIA-UNALM.
- Ceballo, D. (2012). *Deforestación de cuencas hidrográficas*. Conciencia Agroecológica. <http://conciencia-agroecologica.blogspot.com/2013/11/deforestacion-cuencas.html>
- Chávarri Velarde, E. (2017). *Copias del curso Métodos de Análisis en Recursos Hídricos*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial Nomos S.A.
- Citakoglu, H., Cobaner, M., Haktanir, T., & Kisi, O. (2014). Estimation of Monthly Mean Reference Evapotranspiration in Turkey. *Water Resources Management*, 28. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0474-1>
- Condori Flores, Y. (2020). Generación de caudales medios mensuales para la subcuenca del Río Cañipia a partir de las características hidrológicas de la cuenca alta del Río Apurímac. *Universidad Nacional del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/14313>
- Cruz Adrianzén, E. J., & Romero Callo, J. A. (2018). Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: Gr2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la



subcuenca del río Callazas. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.

<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/623192>

Espinoza, J. C. (2005). *El Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos*.

Espinoza Vilca, S. (2018). Evaluación y comparación de seis modelos de simulación de caudales y su validación en las bocatomas Apacheta, Choccoro y Chicllarazo de la Irrigación Cachi—Ayacucho—2016. *Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga*. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2864>

Estrela, T. (1992). *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos* (Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas). Gabinete de formación y Documentación.

FAO, O. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*.

Fonseca, S. (2015). *Manual de modelamiento hidrológico abcd en excel*. Autoridad Nacional del Agua.

Gallo Llumigusin, K. E., & Iza Jiménez, B. A. (2018). *Modelamiento con SWAT y GR2M para la Subcuenca del Río Guayllabamba* [BachelorThesis, Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6372>

Gámez Morales, W. R. (2010). *Texto básico de hidrología* (1a edición). Editronic, S.A.

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Universidad Nacional de La Plata). Editorial de la Universidad de La Plata.



- Gupta, H., Sorooshian, S., & Yapo, P. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG*, 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v.1.1. SENAMHI. *DHI*.
- INRENA. (2003). *Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Ramis* (Estudio de Hidrología, Intendencia de Recursos Hídricos).
- INRENA, I. N. de R. N. I. de R., & Ramis, A. T. del D. de R. (2008). *Actualización del balance hídrico de la Cuenca del río Ramis* (Ministerio de Agricultura). <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3294>
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261.
- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. (2000). *Detecting trend and other changes in hydrological data* (World Meteorological Organization). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4183
- Linsley, Kohler, & Paulus. (1977). *Hidrología para ingenieros* (2da.). McGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A.
- Lobo L., D., Gabriels, D., Ovalles V., F., Santibañez, F., Moyano, M. C., Aguilera, R., Pizarro, R., Sanguesa, C., & Urra, N. (2006). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y El Caribe* (Publicado por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO))



y el Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y Caribe (CAZALAC)).

Lutz Scholz. (1980). *Generación de Caudales Mensuales en al Sierra del Perú. Plan Meris II.*

Mamani Caceres, W. (2015). Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico—Estocástico Lutz Scholz. *Universidad Nacional del Altiplano.*
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4608>

Mamani Mamani, E. (2020). Aplicación de un modelo hidrológico agregado lluvia—Escorrentía a paso de tiempo mensual en la cuenca del río Callacame, Perú. *Universidad Nacional del Altiplano.*
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/14445>

Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20.

Mejía M., J. A. (2006). *Hidrología Aplicada* (Vol. 2).

Mendoza, M. (2015). *Correlacion de Pearson y Sperman.*
https://es.slideshare.net/MarianyelisMendoza/correlacion-de-pearson-y-sperman?from_action=save

Metzger J. (2017). *Modelamiento Hidrológico para Pronóstico estacional de caudales del río Ramis.* Dirección de Hidrología.

Molnar. (2011). Calibration. Watershed Modelling. *SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.* ETH Zürich, Switzerland.



- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (2da.). Escuela Colombiana de ingeniería.
- Moriasi. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1), 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros Adriazo, J., Arapa Guzmán, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). *Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural* (1ª edición). Forest Trends Association. Av. Ricardo Palma 698, Miraflores.
- Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico* (Universidad Central de Venezuela). Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología.
- Quintana Yupanqui, P. D. (2018). Aplicación de los Modelos Hidrológicos para Estimar el Caudal Promedio Mensual en la Subcuenca del Río Shullcas. *Repositorio Institucional - UPLA*. <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/768>
- Quispe Sánchez, J. R. (2013). Generación de caudales medios por modelos determinísticos temez y lutz scholz en la cuenca del río Zapatilla—Ilave. *Universidad Nacional del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5489>
- Rincón Achury, L. V. (2019). *Aplicación de los modelos lluvia-escorrentía GR2M y GR4J en la cuenca del Río Gualí para la gestión de los recursos hídricos*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16704>



- Rojas, P. (2015, febrero 9). ¿Qué es una curva hipsométrica? *Ingeciv*.
<https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Saito, L., Biondi, F., Salas, J. D., Panorska, A. K., & Kozubowski, T. J. (2008). A watershed modeling approach to streamflow reconstruction from tree-ring records. *Environmental Research Letters*, 3(2), 024006.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/2/024006>
- Santayana Vela, S. (2007). *Separatas de Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Agrícola*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Silva, M. (1987). *Análisis comparativo de modelos determinísticos de simulación de cuencas*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima-Perú.
- Tarazona Santos, N. E. (2005). *Generación de descargas mensuales en Subcuencas de la Cuenca del Río Santa utilizando el método de Lutz Scholz*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Tellez Rojas, A. F. (2016). *Modelación hidrológica del sistema de explotación Gállego-Cinca de la confederación hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentía HBV*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Tito C., L. I. (2010). *Calibración del modelo Lutz Scholz en la sub cuenca del río Ayaviri*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Tveito, O. E., & Schöner, W. (2002). *Application of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS)*. Meteorologisk institutt met.no.
- Villón B., M. (2002). *Hidrología* (2da.). Villón.



- Vrugt, J. A., ter Braak, C. J. F., Clark, M. P., Hyman, J. M., & Robinson, B. A. (2008). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research*, 44(12). <https://doi.org/10.1029/2007WR006720>
- Xu, C. (2002). *Hydrologic Models (Lärobok i Avrinningsmodeller)* (edition 2002). Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology.



ANEXOS



Anexo A: Serie histórica de caudales

DESCARGAS MEDIAS MENSUALES (m3/s) - RIO AYAVIRI														
Estación	:	PUENTE AYAVIRI							Cuenca	:	RAMIS			
Longitud Oeste	:	70°35'09.9"							Región	:	PUNO			
Latitud Sur	:	14°53'35.1"							Provincia	:	MELGAR			
Altitud (msnm)	:	3900							Distrito	:	AYAVIRI			
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM	
1981	109.9	158.9	170.0	105.5	25.2	11.3	6.8	4.6	3.9	2.0	1.0	10.4	50.8	
1982	32.7	25.2	17.9	33.1	11.6	3.7	3.2	4.8	4.7	5.4	5.5	17.8	13.8	
1983	6.1	6.0	6.1	5.9	4.8	3.8	3.1	3.1	2.8	2.2	0.0	2.6	3.9	
1984	32.8	122.4	135.9	47.1	12.3	3.4	2.9	3.6	2.4	5.5	8.5	6.8	32.0	
1985	89.5	39.5	67.4	54.6	14.8	3.8	3.3	4.3	2.9	2.3	36.8	31.8	29.3	
1986	76.9	74.9	131.8	43.0	17.5	4.2	3.1	2.4	2.4	3.9	3.6	22.0	32.1	
1987	45.9	6.6	5.2	4.4	7.2	2.9	2.3	2.1	2.3	1.8	16.9	30.3	10.6	
1988	16.4	46.1	141.5	65.5	28.2	5.3	3.6	1.6	0.8	1.3	1.1	8.3	26.6	
1989	82.7	128.2	133.7	91.2	20.5	2.8	2.3	1.4	1.0	4.0	0.5	2.0	39.2	
1990	6.0	4.0	3.2	5.2	7.5	3.6	3.2	2.6	2.7	8.3	20.9	32.0	8.3	
1991	53.2	38.0	27.8	8.5	8.7	2.4	2.4	1.9	1.8	3.0	2.1	9.0	13.2	
1992	24.9	14.9	20.2	17.3	10.9	5.5	3.5	2.9	3.6	5.5	3.6	11.3	10.3	
1993	75.1	84.3	126.3	51.0	16.3	5.1	2.8	1.8	1.5	2.2	17.4	16.0	33.3	
1994	103.0	69.3	32.9	9.1	8.4	4.1	3.5	2.5	1.6	0.9	14.7	29.3	23.3	
1995	59.4	47.9	120.5	45.1	12.7	5.5	3.0	3.2	2.9	3.2	6.2	13.2	26.9	
1996	51.8	131.2	55.6	61.9	19.7	8.9	4.0	3.2	3.5	5.9	8.8	16.7	30.9	
1997	45.1	87.6	73.9	27.8	13.8	8.7	3.7	2.0	2.9	5.4	2.4	3.1	23.0	
1998	82.1	69.1	77.4	31.4	12.1	2.7	2.6	2.0	0.7	4.4	7.5	8.3	25.0	
1999	27.1	65.5	111.4	53.6	10.7	6.1	3.7	2.9	2.8	7.2	1.4	15.4	25.7	
2000	49.1	38.8	25.8	12.4	13.1	3.8	2.9	2.3	1.7	5.0	20.9	14.6	15.9	
2001	110.9	96.2	49.7	43.0	15.0	6.1	3.1	3.1	4.3	5.2	1.5	9.1	28.9	
2002	23.8	82.5	72.9	60.4	18.5	6.7	4.1	2.2	2.1	6.6	14.8	27.0	26.8	
2003	104.9	89.0	93.3	48.2	15.5	3.6	2.6	1.9	1.6	1.1	1.0	13.0	31.3	
2004	78.0	80.4	54.0	25.0	5.3	2.1	2.6	1.6	1.7	1.0	1.5	14.4	22.3	
2005	39.7	71.2	43.6	18.0	4.5	2.2	1.8	1.7	1.2	2.8	7.4	4.8	16.6	
2006	111.4	57.6	37.1	10.0	10.5	2.7	2.1	1.7	1.5	1.3	3.4	3.7	20.2	
2007	20.4	29.3	138.8	45.8	13.6	3.6	2.8	1.8	1.5	1.3	1.9	4.7	22.1	
2008	23.5	66.4	55.2	39.9	8.8	2.8	2.2	2.3	1.4	8.3	0.8	5.6	18.1	
2009	105.8	46.8	59.9	20.8	7.4	3.0	2.5	1.8	1.4	4.7	6.7	6.4	22.3	
2010	52.6	72.7	58.4	23.7	6.1	4.8	4.5	5.4	5.0	1.9	2.2	23.1	21.7	
2011	29.7	80.9	71.6	19.2	5.9	2.3	2.1	2.9	1.8	1.1	5.1	13.4	19.7	
2012	94.6	127.0	149.2	82.3	25.0	8.6	3.9	4.6	3.5	8.4	1.0	7.3	42.9	
2013	124.0	45.1	80.7	37.2	11.1	2.2	1.8	1.2	0.4	2.4	17.7	20.2	28.7	
2014	53.8	127.7	70.8	34.8	20.7	3.2	2.3	1.7	1.6	4.2	0.9	7.2	27.4	
2015	18.5	8.9	17.8	16.5	5.7	1.8	1.9	1.2	1.2	2.1	4.1	8.9	7.4	
2016	36.8	39.3	38.3	15.2	9.3	3.8	2.6	3.5	3.1	8.4	4.7	6.7	14.3	
N° DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	58.3	66.1	71.5	36.5	12.7	4.4	3.0	2.6	2.3	3.9	7.1	13.2	23.5	
DESV.STD	34.0	39.1	46.0	24.5	6.0	2.2	0.9	1.1	1.1	2.3	7.9	8.6	9.9	
MIN	6.0	4.0	3.2	4.4	4.5	1.8	1.8	1.2	0.4	0.9	0.0	2.0	3.9	
MAX	124.0	158.9	170.0	105.5	28.2	11.3	6.8	5.4	5.0	8.4	36.8	32.0	50.8	
MEDIANA	52.2	67.7	63.7	33.9	11.8	3.8	2.9	2.3	2.0	3.5	3.9	10.9	23.1	

Fuente: ANA 2019



Anexo B: Código en Rstudio para la extracción de datos meteorológicos de las bases de datos de precipitación PISCOpm v.2.1 y de temperatura PISCOt v.1.1

```
1 ## Leer puntos de estaciones de datos PISCO de prec a partir de
2 # puntos de estaciones que estan almacenados en un archivo *.csv
3 # Autores: Adrian Huerta & Waldo Lavado
4 setwd("E:/2022/Leer PISCO")# Esta es la ruta de la carpeta donde esta Pisco
5 # y deben estar el archivo *.csv con los puntos a extraer
6 # ojo que es / no \
7 # Descargar datos PISCO de: http://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones
8 # En la parte inferior ir a la carpeta Datos SONICS (DESCARGAS)
9 # bajar de preferencia los datos de la carpeta PISCO_v2.1
10 #ftp://ftp.senamhi.gob.pe/PISCO_v2.0/ ## PISCO_Pd_v2.1 son diarios y
11 # PISCO_Pm_v2.1 son mensuales
12 # Este ejemplo es para los datos mensuales PISCOpm.nc
13 rm(list = ls())
14 install.packages("raster")#Instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
15 install.packages("ncdf4")#Instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
16 library(raster)#cargar el paquete
17 library(ncdf4)#cargar el paquete
18 ## Leer el archivo long_lat.csv (ver el archivo ejemplo)
19 ## para agregar solo disminuya o incremente las coordenadas de las filas
20 ## XX Longitud e YY Latitud
21 long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
22 ### Ensamblamos los datos *.nc
23 raster_pp <- raster::brick("PISCOpm.nc")
24 ## Asignamos las coordenadas
25 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
26 # Igualamos las proyecciones del raster y de los puntos a extraer
27 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
28 # Extraemos los valores
29 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
30 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
31 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
32 # Guardamos los datos como "data_long_lat.csv" Ud puede cambiar el nombre
33 # Las filas son los datos mensuales en este caso y las columnas son los puntos
34 #seleccionados
35 # Ojo que el orden esta de acuerdo al archivo long_lat.csv, de la columna NN
36 write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)
```

Anexo C: Análisis de información pluviométrica

Figura 68

Análisis de datos de la estación Ayaviri

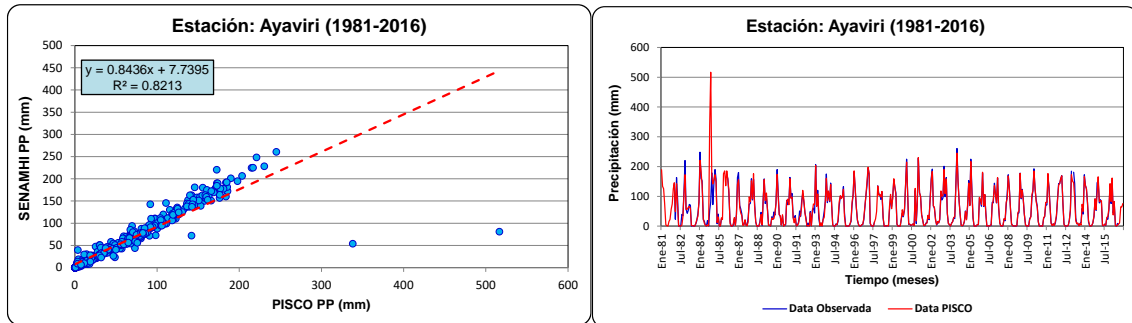


Figura 69

Análisis de datos de la estación Chuquibambilla

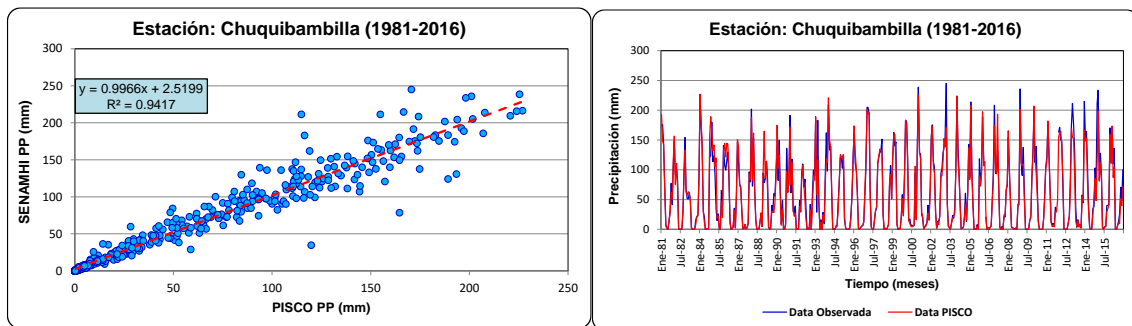


Figura 70

Análisis de datos de la estación La Raya

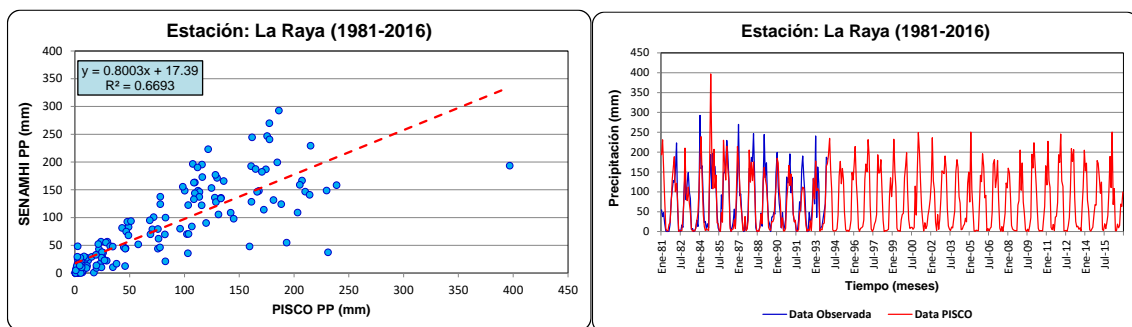


Figura 71

Análisis de datos de la estación Llalli

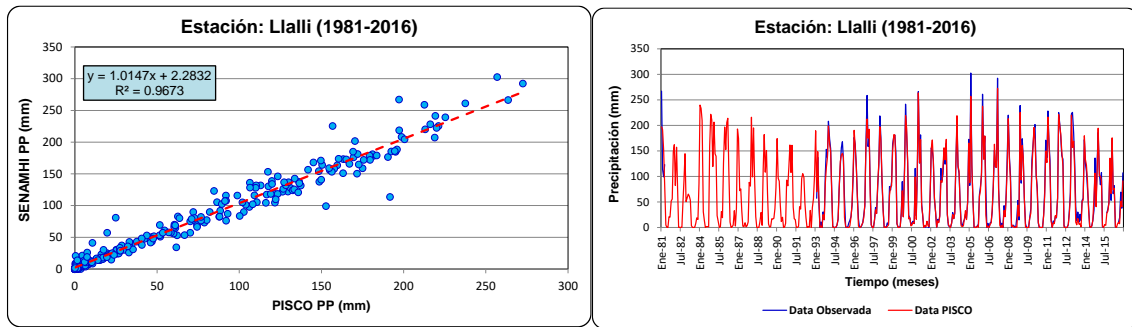


Figura 72

Análisis de datos de la estación Nuñoa

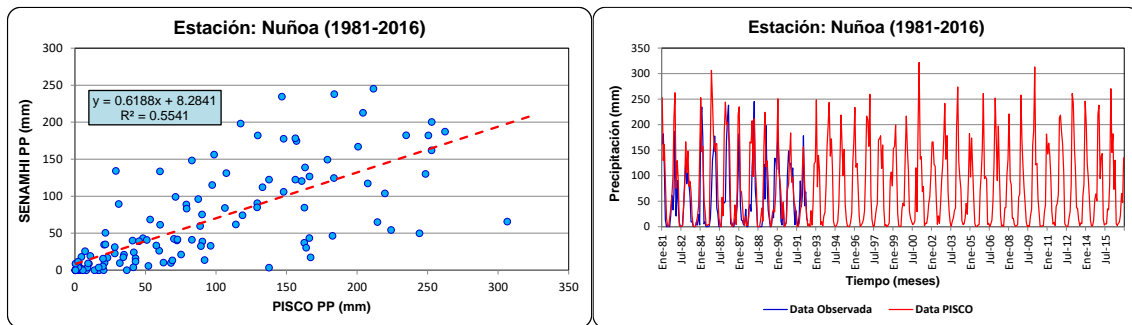


Figura 73

Análisis de datos de la estación Orurillo

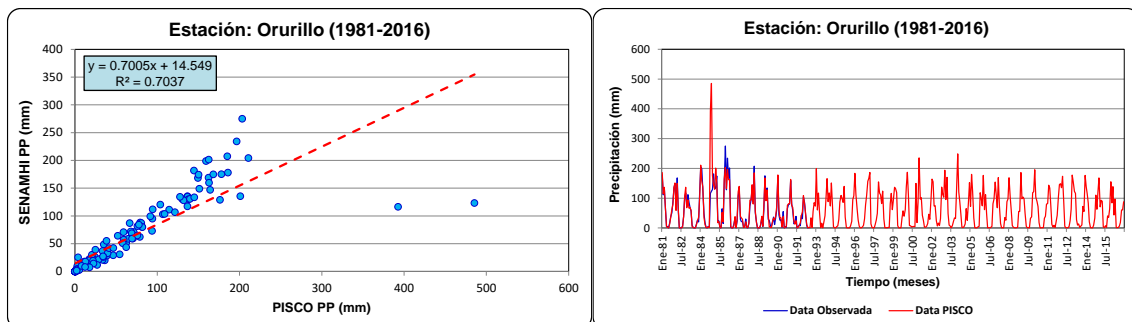


Figura 74

Análisis de datos de la estación Quillisani

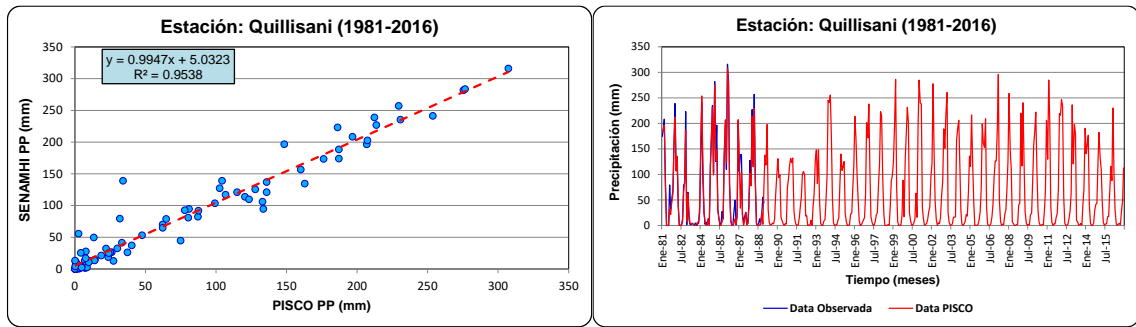
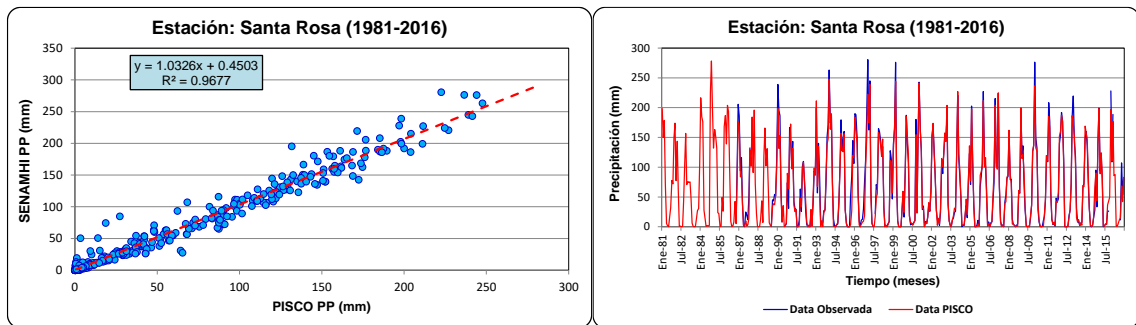


Figura 75

Análisis de datos de la estación Santa Rosa





Anexo D: Precipitación mensual PISCOpm v.2.1

PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	AYAVIRI												
Longitud Oeste	:	70°35'34.4"												
Latitud Sur	:	14°52'21.6"												
Altitud (msnm)	:	3928												
Tipo	:	CO												
Región	:	PUNO												
Provincia	:	MELGAR												
Distrito	:	AYAVIRI												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	189.6	133.8	125.8	74.9	4.3	1.9	0.0	15.8	22.8	56.9	74.2	124.8	824.9	
1982	145.9	48.8	142.0	69.5	0.0	0.7	0.0	3.6	32.8	107.6	172.5	56.2	779.7	
1983	57.0	63.1	66.5	59.3	2.2	1.8	0.2	0.1	7.8	21.6	33.6	85.4	398.6	
1984	221.0	183.8	137.7	25.5	9.8	2.7	0.4	4.4	0.9	338.1	516.6	171.1	1611.9	
1985	141.9	157.6	172.7	148.3	12.1	30.4	0.0	0.5	27.9	22.2	175.9	185.7	1075.3	
1986	135.7	185.7	156.6	122.8	8.5	0.1	0.1	5.7	28.7	2.6	38.7	140.0	825.1	
1987	155.5	62.5	43.9	35.6	2.7	3.7	21.0	2.6	1.4	14.3	98.4	82.5	524.1	
1988	152.2	91.5	176.1	68.7	14.1	0.0	0.0	0.1	11.1	39.2	4.3	88.4	645.7	
1989	156.2	85.8	111.5	52.9	3.4	2.9	0.8	27.6	23.2	25.2	42.6	76.7	608.9	
1990	173.7	97.4	38.7	35.0	3.6	37.9	0.0	3.7	8.1	83.6	90.8	72.0	644.4	
1991	159.5	93.2	97.5	26.5	11.2	27.6	0.6	2.6	9.1	30.0	39.2	67.5	564.4	
1992	120.2	87.0	44.9	20.5	0.0	2.3	0.1	44.3	1.3	46.7	74.4	73.0	514.6	
1993	203.4	66.4	107.6	46.9	0.6	11.0	0.4	21.6	30.3	83.1	160.6	84.8	816.6	
1994	118.3	85.0	139.5	67.8	3.6	0.2	0.0	5.8	5.2	21.1	80.3	102.2	629.1	
1995	92.2	99.4	123.8	31.5	0.6	0.1	0.1	0.2	5.6	19.2	80.7	105.8	559.1	
1996	185.4	129.1	60.2	21.7	6.4	0.1	0.3	4.9	6.5	26.2	65.4	102.4	608.5	
1997	153.1	197.9	176.9	11.3	1.8	0.1	0.0	14.0	24.1	48.6	134.9	104.0	866.8	
1998	106.5	97.8	116.6	30.1	0.0	1.0	0.0	1.7	0.9	67.6	106.6	58.4	587.2	
1999	93.4	159.1	131.9	103.9	6.7	0.1	0.1	0.2	23.8	55.0	34.3	59.2	667.6	
2000	139.0	215.0	110.5	7.3	6.0	3.0	3.8	7.9	2.4	126.6	17.8	80.6	719.8	
2001	230.4	112.8	99.2	38.0	20.1	2.4	2.5	8.0	10.7	36.5	25.2	93.6	679.3	
2002	155.0	183.7	68.0	63.2	19.7	5.5	15.6	10.7	23.7	118.4	100.3	104.4	868.2	
2003	189.8	109.3	158.6	44.0	8.4	6.1	0.1	9.5	15.1	29.2	31.6	124.5	726.3	
2004	245.1	150.8	84.9	41.8	2.7	1.1	5.1	17.0	48.8	21.3	76.3	144.0	838.6	
2005	68.9	216.8	115.4	30.3	0.2	0.1	0.0	4.8	4.5	97.0	88.4	72.7	699.1	
2006	180.9	68.4	106.1	42.7	0.0	1.4	0.0	2.5	4.1	70.5	87.7	136.3	700.8	
2007	104.5	79.0	162.9	68.4	10.1	0.1	0.5	0.6	25.4	21.6	79.9	92.7	645.7	
2008	168.4	118.8	57.1	6.1	2.2	0.8	0.0	0.8	2.3	46.1	50.8	176.9	630.4	
2009	94.7	121.0	89.5	40.6	4.4	0.1	1.0	0.3	21.7	31.7	105.9	119.4	630.4	
2010	184.8	130.5	80.9	65.0	14.4	0.1	0.1	0.8	0.3	28.5	32.5	80.1	617.9	
2011	79.3	176.3	125.0	66.5	8.8	1.8	8.3	2.1	15.9	35.4	90.4	138.4	748.0	
2012	143.1	159.9	168.8	75.0	5.0	0.1	0.6	0.3	3.2	19.7	56.4	172.7	805.0	
2013	151.7	145.7	91.8	18.6	8.1	10.8	1.7	8.7	3.3	73.4	49.9	166.1	730.0	
2014	136.2	126.4	80.6	18.7	1.2	0.1	1.5	11.4	35.2	91.9	55.6	110.9	669.8	
2015	165.8	82.4	84.8	85.5	3.6	1.0	6.8	3.1	29.8	31.9	59.6	142.5	696.7	
2016	83.0	161.5	37.3	82.7	1.7	0.7	3.2	7.4	10.8	65.0	64.2	75.9	593.4	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	146.7	124.5	108.1	51.3	5.8	4.4	2.1	7.1	14.7	57.0	86.0	107.5	715.3	
DESV.STD	44.6	45.5	40.6	31.4	5.3	8.8	4.4	9.0	12.3	56.8	83.2	36.3	195.3	
MIN	57.0	48.8	37.3	6.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	2.6	4.3	56.2	398.6	
MAX	245.1	216.8	176.9	148.3	20.1	37.9	21.0	44.3	48.8	338.1	516.6	185.7	1611.9	
MEDIANA	152.0	119.9	109.0	43.4	4.0	1.1	0.3	4.0	10.8	37.8	74.3	102.3	674.6	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	CHUQUIBAMBILLA							Tipo	:	CP			
Longitud Oeste	:	70°42'56.5"							Región	:	PUNO			
Latitud Sur	:	14°47'05.2"							Provincia	:	MELGAR			
Altitud (msnm)	:	3971							Distrito	:	UMACHIRI			
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	192.5	148.6	142.0	70.6	5.3	1.9	0.0	15.2	25.0	61.7	50.6	116.5	829.9	
1982	156.4	75.0	110.6	69.7	0.1	1.1	0.0	0.4	32.6	84.7	132.8	62.9	726.3	
1983	57.7	63.1	62.0	48.8	3.3	0.0	0.0	0.0	7.8	20.7	22.8	87.7	374.1	
1984	227.0	184.6	145.7	29.8	11.7	0.4	1.1	1.2	1.8	157.2	189.2	164.5	1114.1	
1985	131.9	141.8	105.1	119.9	19.6	22.1	0.0	0.8	46.9	20.0	131.5	144.3	883.8	
1986	121.6	144.6	143.3	99.9	10.1	0.0	0.8	5.6	31.8	2.9	56.9	150.9	768.5	
1987	138.1	74.0	68.9	33.9	1.6	1.0	8.5	1.1	2.5	9.9	92.7	84.3	516.6	
1988	187.6	82.1	161.9	73.1	16.4	0.0	0.0	0.0	11.0	27.8	5.1	98.8	663.6	
1989	164.6	87.5	114.4	67.9	4.5	1.7	0.5	30.7	28.8	28.3	44.5	85.2	658.8	
1990	174.8	102.7	124.5	54.2	7.1	34.3	0.0	0.5	6.7	97.4	61.8	93.1	757.1	
1991	171.6	75.2	112.2	32.6	21.9	27.1	0.0	0.1	1.7	38.8	28.9	83.2	593.3	
1992	107.2	72.9	49.6	17.0	0.0	2.0	0.0	33.0	0.2	41.2	79.7	83.4	486.2	
1993	189.2	58.7	116.4	51.7	0.1	11.2	0.0	24.5	15.1	80.9	119.0	112.2	779.1	
1994	220.8	149.1	137.7	65.3	0.2	0.0	0.0	3.6	5.4	29.7	74.4	125.3	811.7	
1995	121.8	119.4	126.0	21.5	2.5	0.0	0.0	0.0	2.3	20.9	66.5	111.4	592.3	
1996	173.7	129.9	101.3	54.4	2.0	0.0	2.3	5.9	6.6	13.9	64.0	116.0	670.0	
1997	201.7	193.8	196.0	51.6	3.7	0.0	0.0	15.8	31.6	38.0	110.2	123.0	965.4	
1998	135.0	133.5	129.8	25.9	0.0	1.9	0.0	2.3	7.0	76.8	92.1	52.2	656.5	
1999	120.3	160.0	159.7	111.9	8.3	0.0	0.0	0.7	21.2	51.7	22.5	84.3	740.6	
2000	182.8	175.2	110.9	15.0	9.7	5.0	4.2	5.9	7.4	105.8	16.3	128.2	766.2	
2001	225.4	128.4	118.3	29.1	22.0	0.8	4.3	5.4	11.5	27.2	15.4	66.4	654.2	
2002	150.3	172.4	108.1	94.9	27.5	2.1	11.8	7.7	21.9	90.1	90.1	114.7	891.5	
2003	152.6	138.3	170.6	39.6	6.1	3.2	0.0	10.6	18.5	22.3	27.1	96.8	685.7	
2004	224.0	114.7	85.9	43.2	2.2	2.1	3.0	18.1	42.6	15.5	58.8	136.7	746.7	
2005	83.8	207.9	96.9	38.8	0.1	0.0	0.0	4.8	0.1	89.7	72.5	93.0	687.6	
2006	197.2	106.7	114.0	28.8	0.2	3.1	0.0	3.8	6.0	43.1	77.6	174.2	754.8	
2007	101.4	93.2	193.4	78.1	4.2	0.0	2.6	0.0	24.9	24.7	64.4	77.1	664.0	
2008	165.5	93.2	48.2	3.6	3.2	1.2	0.0	1.8	0.3	42.4	40.9	201.1	601.5	
2009	110.7	107.0	110.2	49.7	0.3	0.0	0.2	0.0	14.2	24.0	89.3	123.6	629.1	
2010	207.0	124.0	93.8	58.1	11.7	0.0	0.0	0.2	0.1	17.1	49.3	101.8	663.1	
2011	113.3	181.8	128.5	67.6	11.2	4.3	7.5	4.2	30.6	28.9	49.5	155.3	782.8	
2012	162.4	164.6	141.2	83.5	0.3	0.1	0.0	0.0	10.9	21.4	65.6	169.6	819.6	
2013	154.9	151.3	84.4	14.2	5.3	14.2	3.5	6.7	1.8	55.2	47.3	166.7	705.5	
2014	148.4	153.6	80.8	32.7	1.7	0.0	1.2	24.0	52.7	85.2	48.3	114.9	743.5	
2015	198.2	82.2	112.4	87.3	2.3	0.4	4.3	4.1	29.8	34.7	41.0	159.1	755.8	
2016	110.9	173.4	87.3	104.5	0.4	0.2	4.8	11.5	9.5	51.3	39.8	71.3	665.0	
N° DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	157.8	126.8	116.4	54.7	6.3	3.9	1.7	7.0	15.8	46.7	65.0	114.7	716.8	
DESV.STD	41.9	40.4	34.5	29.2	7.2	7.9	2.8	8.9	14.2	33.3	37.6	35.5	131.2	
MIN	57.7	58.7	48.2	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.9	5.1	52.2	374.1	
MAX	227.0	207.9	196.0	119.9	27.5	34.3	11.8	33.0	52.7	157.2	189.2	201.1	1114.1	
MEDIANA	159.4	129.2	113.2	51.7	3.5	0.9	0.0	4.0	11.0	36.3	60.3	113.5	715.9	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	LA RAYA											
Longitud Oeste	:	71°0'00"											
Latitud Sur	:	14°30'00"											
Altitud (msnm)	:	4120											
Tipo	:	CO											
Región	:	CUSCO											
Provincia	:	CANAS											
Distrito	:	LAYO											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	193.2	231.1	159.4	82.6	6.8	1.8	1.6	17.3	22.9	70.7	131.1	161.1	1079.7
1982	188.3	100.2	121.6	76.4	0.9	1.3	2.4	2.4	34.7	82.7	210.2	96.0	917.1
1983	77.9	112.3	71.9	49.0	7.6	1.0	2.4	1.1	8.5	25.1	45.8	106.7	509.5
1984	186.2	238.8	135.7	43.1	12.1	2.5	6.8	4.1	2.8	181.2	396.9	203.2	1413.5
1985	107.6	207.3	109.5	142.2	21.9	19.8	1.8	0.7	47.8	23.8	229.7	167.9	1080.1
1986	129.7	215.1	160.9	127.7	8.4	0.4	5.5	6.4	29.5	7.8	102.2	214.3	1007.9
1987	177.5	119.7	68.4	46.2	3.2	2.0	38.0	2.3	6.3	28.3	205.2	124.6	821.9
1988	174.2	128.3	175.4	113.7	24.2	0.5	1.8	0.6	11.1	44.7	19.6	128.7	822.7
1989	161.7	133.3	116.3	75.7	10.7	4.4	3.3	25.7	24.6	32.2	75.7	109.5	773.2
1990	184.7	172.4	103.7	77.7	10.6	34.6	1.6	1.7	8.3	78.0	115.7	166.3	955.2
1991	116.0	145.0	113.5	46.0	24.2	29.0	2.0	0.4	5.0	46.8	57.7	98.5	684.1
1992	111.9	108.6	51.1	15.2	0.6	5.2	2.6	27.0	2.3	48.9	133.1	82.1	588.8
1993	177.6	103.0	108.5	103.3	0.9	6.2	4.4	19.1	21.4	68.9	164.9	170.7	949.0
1994	191.4	234.7	155.7	105.1	4.2	1.4	1.9	2.4	7.5	41.5	139.6	177.0	1062.4
1995	120.3	159.0	130.8	47.4	5.4	0.9	3.4	0.4	6.9	29.0	148.9	130.2	782.5
1996	167.8	214.2	121.6	77.8	8.5	0.6	8.1	9.9	13.0	29.4	131.5	170.1	952.4
1997	150.5	231.4	190.3	64.9	6.1	0.4	6.1	18.8	26.0	42.4	193.3	147.3	1077.5
1998	148.3	180.9	108.5	28.7	0.2	2.9	1.6	3.5	5.7	89.1	135.3	88.0	792.6
1999	125.5	232.5	153.7	112.2	8.3	1.5	2.1	0.4	29.7	43.1	45.7	136.4	891.2
2000	163.7	198.6	99.5	30.7	7.9	10.0	10.9	5.8	10.2	114.5	41.4	153.4	846.6
2001	249.3	196.4	122.2	59.6	27.7	1.5	22.1	7.5	15.2	40.6	56.7	82.5	881.4
2002	125.0	236.3	127.9	104.8	23.0	2.7	42.9	5.7	30.8	85.2	153.0	149.9	1087.2
2003	145.7	190.2	152.2	58.0	14.0	6.5	2.4	11.4	9.1	31.8	52.0	148.5	821.8
2004	181.0	161.4	87.9	71.9	4.6	6.1	14.2	18.6	33.9	24.4	122.2	149.6	875.9
2005	74.4	250.6	105.9	52.1	1.9	0.4	3.4	2.7	1.9	66.6	141.8	125.8	827.3
2006	196.0	162.5	84.8	91.2	1.9	7.5	2.0	8.0	11.4	49.4	170.6	181.0	966.2
2007	110.6	132.7	179.1	81.4	8.8	0.8	12.5	0.5	22.3	46.7	122.3	109.8	827.4
2008	159.7	147.3	87.2	15.1	6.6	3.8	2.3	2.4	2.1	66.8	77.8	205.3	776.4
2009	104.0	172.7	74.6	47.1	4.3	0.5	6.3	0.6	13.3	35.2	194.9	160.1	813.6
2010	223.4	172.5	117.2	57.4	8.0	1.1	2.4	2.5	1.6	32.7	63.3	165.7	847.7
2011	117.3	227.1	128.9	111.4	10.4	4.6	18.1	2.9	36.5	38.8	72.7	193.3	962.0
2012	174.2	245.7	127.1	113.8	1.7	2.4	2.7	0.5	15.0	35.2	104.1	209.1	1031.4
2013	176.6	206.4	85.4	24.9	11.7	13.4	5.8	9.4	2.0	60.5	110.9	204.7	911.7
2014	153.0	172.4	79.1	56.9	4.6	1.2	6.0	10.9	43.3	67.6	66.8	178.6	840.5
2015	171.9	134.1	96.4	124.5	5.1	2.5	19.7	7.2	21.3	40.5	100.7	189.2	913.0
2016	110.9	250.6	68.1	108.1	2.1	2.0	18.9	9.4	14.9	69.3	63.3	99.5	817.1
N° DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	153.5	181.3	116.1	73.4	8.6	5.1	8.1	7.0	16.6	53.3	122.1	149.6	894.7
DESV.STD	38.8	46.3	33.7	33.3	7.2	7.6	9.7	7.3	12.5	31.1	70.5	38.3	155.6
MIN	74.4	100.2	51.1	15.1	0.2	0.4	1.6	0.4	1.6	7.8	19.6	82.1	509.5
MAX	249.3	250.6	190.3	142.2	27.7	34.6	42.9	27.0	47.8	181.2	396.9	214.3	1413.5
MEDIANA	160.7	176.8	114.9	73.8	7.2	2.2	3.4	3.8	13.1	43.9	119.0	151.7	878.6

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	LLALLI											
Longitud Oeste	:	70°53'09.4"											
Latitud Sur	:	14°56'11.5"											
Altitud (msnm)	:	3980											
Tipo	:	CO											
Región	:	PUNO											
Provincia	:	MELGAR											
Distrito	:	LLALLI											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	197.2	191.7	152.8	84.6	5.1	0.5	0.0	20.9	20.4	51.9	56.0	147.7	928.9
1982	162.4	82.4	157.4	76.0	0.3	0.3	0.0	0.6	49.1	91.7	144.4	50.6	815.2
1983	58.8	65.5	61.5	53.4	3.5	0.1	0.1	0.4	7.5	19.0	15.8	86.2	371.8
1984	239.9	233.4	210.0	30.9	14.0	0.1	1.8	1.7	1.4	159.9	221.7	211.2	1326.0
1985	119.4	206.5	144.4	139.7	23.4	12.7	0.0	1.5	31.1	19.3	126.9	196.9	1021.9
1986	152.7	205.5	214.0	109.8	11.0	0.0	1.6	4.9	32.9	3.0	38.3	193.1	966.8
1987	174.8	72.3	75.7	32.7	2.7	1.6	9.4	1.4	4.0	11.0	88.5	81.1	555.1
1988	216.1	99.3	195.1	97.4	21.4	0.0	0.1	0.3	11.1	29.5	4.4	114.1	788.8
1989	182.1	108.4	150.9	68.0	6.8	0.9	1.6	17.2	16.6	18.1	37.0	78.7	686.2
1990	174.1	96.2	90.6	44.9	11.8	20.2	0.0	0.9	8.3	92.8	81.6	119.9	741.4
1991	161.7	107.8	161.2	39.8	17.2	15.6	0.1	0.2	2.5	40.8	36.1	95.8	678.9
1992	105.5	98.2	46.6	19.1	0.3	1.4	0.6	33.6	0.3	39.5	55.6	105.0	505.5
1993	189.5	70.2	148.7	62.2	0.5	3.1	0.1	25.2	15.9	86.5	117.4	136.4	855.7
1994	198.7	163.2	148.4	70.2	0.7	0.0	0.0	0.8	5.2	16.9	73.4	129.6	807.4
1995	141.9	145.1	137.4	19.6	1.7	0.0	0.1	0.3	3.0	20.5	46.9	106.1	622.6
1996	190.4	159.6	116.7	54.5	3.1	0.0	0.4	5.1	9.1	19.5	46.1	157.8	762.4
1997	212.6	175.0	192.5	62.6	5.4	0.0	0.0	15.2	34.7	27.4	87.9	126.3	939.6
1998	197.3	169.5	102.8	33.2	0.2	0.9	0.0	2.0	5.0	63.6	78.7	82.0	735.4
1999	150.4	181.9	181.2	123.5	8.4	0.0	0.0	1.5	27.2	72.0	21.1	109.3	876.5
2000	219.3	195.1	131.2	16.8	18.9	3.3	4.8	9.9	7.9	98.8	16.0	116.2	838.3
2001	263.5	126.8	172.0	42.4	26.0	0.2	3.7	1.8	12.3	3.6	1.8	74.3	728.3
2002	155.0	171.6	128.3	60.0	30.0	0.8	13.1	9.3	21.2	91.9	88.5	121.6	891.4
2003	156.3	132.5	172.7	26.7	6.5	2.0	0.0	8.8	25.3	17.4	27.5	121.8	697.4
2004	218.9	120.8	110.7	46.7	3.2	1.9	3.4	17.0	32.8	15.6	51.9	165.1	788.2
2005	88.0	257.0	123.4	48.1	0.4	0.0	0.0	3.2	0.4	61.1	72.8	108.1	762.5
2006	237.5	133.7	179.3	24.9	0.4	2.9	0.0	6.1	9.0	35.3	80.2	163.2	872.6
2007	119.2	117.7	272.5	76.7	4.5	0.1	4.6	0.1	33.2	21.3	60.5	119.9	830.2
2008	213.1	130.0	89.4	1.6	4.5	0.7	0.0	1.9	0.4	43.7	22.1	225.4	732.9
2009	93.0	160.5	136.5	58.5	0.6	0.0	0.5	0.2	17.1	28.5	113.0	154.7	763.1
2010	196.0	170.4	103.9	71.0	10.7	0.0	0.2	0.2	0.3	22.6	60.6	149.7	785.6
2011	127.3	216.2	167.1	110.3	13.2	0.3	9.0	7.6	23.7	19.5	57.1	221.2	972.5
2012	200.6	183.6	149.9	120.0	0.6	0.0	0.0	0.2	6.2	27.4	61.0	220.0	969.5
2013	156.8	169.3	110.1	10.7	5.3	17.4	6.6	7.5	1.5	51.6	53.5	179.6	769.8
2014	133.4	122.2	92.0	37.7	2.1	0.0	2.7	13.9	61.7	106.4	40.7	106.5	719.3
2015	194.6	101.9	100.3	91.9	2.1	0.0	5.9	4.4	27.6	32.1	47.6	135.9	744.4
2016	66.7	175.7	74.3	76.8	1.5	0.1	7.0	10.3	7.4	51.6	40.7	91.3	603.3
N° DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	168.5	147.7	138.9	59.5	7.4	2.4	2.2	6.6	15.9	44.8	63.2	133.4	790.4
DESV.STD	48.5	47.2	46.8	33.6	8.0	5.1	3.3	8.0	14.6	34.7	42.4	44.7	161.7
MIN	58.8	65.5	46.6	1.6	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	3.0	1.8	50.6	371.8
MAX	263.5	257.0	272.5	139.7	30.0	20.2	13.1	33.6	61.7	159.9	221.7	225.4	1326.0
MEDIANA	174.4	152.4	140.9	56.5	4.5	0.3	0.2	2.6	10.1	30.8	55.8	121.7	777.7

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	NUÑO A							Tipo	:	PLU			
Longitud Oeste	:	70°38' 00"							Región	:	PUNO			
Latitud Sur	:	14°29' 00"							Provincia	:	MELGAR			
Altitud (msnm)	:	4135							Distrito	:	NUÑO A			
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	252.8	129.6	160.8	91.9	16.4	2.3	0.6	17.0	34.7	60.3	96.2	214.5	1077.2	
1982	262.4	75.3	129.3	90.4	2.5	1.3	0.5	1.8	40.8	79.0	166.3	106.3	955.8	
1983	147.9	79.1	88.8	68.1	21.0	1.2	0.7	0.5	9.8	19.5	41.7	137.6	616.0	
1984	252.9	146.7	157.0	52.0	31.8	3.9	2.4	4.2	4.5	167.1	306.4	248.6	1377.7	
1985	179.0	147.9	163.1	162.6	59.7	20.3	0.3	0.7	57.7	21.5	182.6	244.3	1239.7	
1986	200.8	204.2	183.9	162.7	19.7	0.5	1.2	8.0	42.9	4.6	72.3	219.8	1120.5	
1987	234.8	70.1	69.0	43.0	8.9	2.2	20.7	2.0	5.1	21.6	166.1	163.9	807.5	
1988	207.6	98.7	211.6	118.8	72.6	0.5	0.3	0.2	13.8	36.8	10.9	156.2	928.1	
1989	224.1	117.5	129.2	89.3	23.0	5.6	0.7	28.3	34.3	29.0	60.3	132.9	874.0	
1990	250.6	107.3	90.1	62.7	16.8	48.2	0.3	2.3	9.2	71.3	82.9	137.6	879.3	
1991	183.6	87.4	97.3	51.0	41.3	28.2	0.4	0.4	7.2	31.0	45.4	114.1	687.2	
1992	156.3	82.9	53.3	19.9	2.2	5.8	0.5	31.6	3.3	46.7	123.4	127.3	653.1	
1993	248.7	78.1	139.8	109.7	3.9	10.1	1.6	20.6	28.7	78.8	157.5	197.4	1075.0	
1994	243.6	138.5	172.2	116.5	11.1	1.7	0.3	3.7	10.6	43.8	120.3	218.8	1081.1	
1995	157.9	99.9	151.7	43.8	13.1	0.9	1.0	0.2	8.4	26.5	124.9	167.1	795.5	
1996	233.6	116.7	123.9	75.6	21.3	0.6	3.4	7.8	14.5	31.5	106.6	217.0	952.6	
1997	209.6	157.7	259.6	60.2	14.4	0.5	1.3	17.0	34.7	45.1	170.9	172.2	1143.2	
1998	178.3	114.3	160.4	35.3	2.1	4.2	0.3	2.7	7.3	92.5	107.3	79.9	784.5	
1999	152.8	157.2	199.3	112.6	25.3	2.2	0.6	0.3	35.4	46.3	40.7	142.6	915.2	
2000	217.0	152.5	111.5	30.0	16.1	9.9	4.3	6.0	12.3	115.5	29.3	190.4	894.9	
2001	321.7	132.5	137.2	68.8	79.0	1.8	7.0	6.7	20.2	45.6	58.8	104.9	984.3	
2002	165.6	166.4	121.8	118.9	50.6	4.7	21.4	6.8	41.7	92.2	121.2	175.3	1086.6	
2003	241.6	132.2	178.5	68.0	30.7	8.0	0.9	11.4	17.9	31.9	36.8	192.1	950.1	
2004	273.8	127.0	96.7	75.3	11.7	4.3	6.0	17.7	45.7	24.4	93.0	182.6	958.2	
2005	97.3	174.0	118.2	52.0	6.3	0.4	0.6	3.4	3.8	72.0	103.4	151.2	782.7	
2006	261.0	94.4	98.2	93.6	4.8	6.7	0.5	5.9	13.1	50.6	123.1	252.1	1004.0	
2007	174.8	90.6	197.4	109.4	21.5	1.0	3.4	0.6	37.3	37.5	102.6	131.2	907.1	
2008	221.0	91.6	81.9	16.8	16.6	4.2	0.5	2.1	4.3	58.1	63.9	257.8	819.0	
2009	168.2	118.5	77.2	47.2	9.1	0.5	2.5	0.7	20.4	34.9	159.4	188.7	827.4	
2010	313.1	121.4	123.9	54.8	28.9	1.2	0.7	2.0	2.0	28.9	41.9	181.6	900.5	
2011	142.6	163.7	141.9	97.3	29.4	5.1	8.4	2.5	39.7	45.2	63.6	213.3	952.7	
2012	218.6	186.6	163.7	106.9	5.9	2.2	1.0	0.5	17.8	29.6	80.3	260.9	1073.9	
2013	243.9	154.8	110.1	36.8	36.3	14.4	2.1	7.3	6.3	61.3	82.9	245.9	1002.2	
2014	204.8	123.5	97.3	58.5	12.2	1.2	2.2	12.4	53.2	64.3	50.6	220.1	900.4	
2015	238.0	94.4	137.8	143.3	15.4	3.4	6.0	5.6	35.4	33.1	83.9	270.2	1066.5	
2016	145.6	182.0	73.2	130.4	5.9	2.3	6.6	9.0	21.8	65.1	47.3	135.3	824.6	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	211.8	125.4	133.5	79.8	21.9	5.9	3.1	6.9	22.1	51.2	97.9	182.0	941.6	
DESV.STD	49.1	34.6	44.6	37.7	18.6	9.2	4.9	7.8	15.8	30.7	56.8	49.9	155.7	
MIN	97.3	70.1	53.3	16.8	2.1	0.4	0.3	0.2	2.0	4.6	10.9	79.9	616.0	
MAX	321.7	204.2	259.6	162.7	79.0	48.2	21.4	31.6	57.7	167.1	306.4	270.2	1377.7	
MEDIANA	217.8	122.5	129.2	72.1	16.5	2.3	1.0	3.9	17.8	45.2	88.4	182.1	939.1	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	: ORURILLO							Tipo	: PLU					
Longitud Oeste	: 70°31'00"							Región	: PUNO					
Latitud Sur	: 14°44'00"							Provincia	: MELGAR					
Altitud (msnm)	: 3920							Distrito	: ORURILLO					
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	185.8	114.4	136.7	71.4	4.4	2.4	0.0	13.2	35.4	62.3	79.2	136.8	842.2	
1982	151.2	59.0	149.4	64.8	0.0	0.2	0.0	3.1	37.9	106.9	136.7	67.9	777.0	
1983	94.4	66.5	69.0	59.2	4.9	1.1	0.1	0.0	10.7	24.2	36.1	103.7	469.8	
1984	210.7	159.2	138.1	35.0	11.4	1.9	0.3	3.8	2.3	392.7	485.5	176.2	1617.1	
1985	144.6	130.3	201.0	150.1	17.4	21.5	0.0	0.5	51.9	20.2	164.2	203.3	1105.1	
1986	132.1	196.6	162.3	162.5	4.5	0.0	0.1	7.3	38.0	1.2	32.0	121.4	858.0	
1987	139.9	38.9	33.4	28.9	2.0	2.0	20.6	1.4	1.0	16.5	93.7	94.0	472.3	
1988	144.9	80.6	185.1	58.0	17.7	0.0	0.0	0.0	11.1	39.2	5.5	78.7	620.9	
1989	168.2	91.6	127.6	46.4	3.8	2.8	1.3	22.0	33.6	26.9	39.7	70.5	634.3	
1990	178.0	62.2	34.6	34.0	3.1	38.2	0.0	2.9	5.4	75.7	81.5	81.8	597.5	
1991	162.9	76.0	69.4	22.4	12.6	24.8	0.1	2.0	8.0	17.6	41.3	54.4	491.7	
1992	109.0	77.6	46.6	12.2	0.0	2.1	0.0	34.2	1.7	56.1	84.7	73.5	497.7	
1993	198.8	60.2	117.3	53.4	0.5	16.4	0.4	18.5	40.8	102.0	165.5	88.3	862.1	
1994	117.7	74.1	151.3	78.4	4.2	0.0	0.0	4.6	7.2	28.4	87.4	109.1	662.4	
1995	98.6	86.1	139.7	36.8	1.0	0.0	0.1	0.0	7.2	22.0	95.3	108.4	595.0	
1996	183.4	112.8	64.5	26.9	6.8	0.0	0.4	3.6	8.4	30.4	78.0	108.7	623.8	
1997	156.8	167.0	186.6	14.0	2.2	0.0	0.0	12.0	26.5	49.2	154.7	117.1	886.0	
1998	111.3	82.0	123.9	30.3	0.0	1.1	0.0	1.5	1.6	81.7	116.4	61.7	611.4	
1999	93.6	136.7	131.5	119.3	8.0	0.0	0.0	0.0	32.9	57.3	39.3	61.6	680.2	
2000	138.2	186.9	111.6	8.3	7.3	3.0	4.7	5.2	4.2	149.4	18.1	85.3	722.0	
2001	235.2	96.8	101.7	42.5	25.5	2.8	2.6	6.1	15.4	45.8	29.0	95.4	698.7	
2002	164.2	155.0	74.0	74.9	24.7	6.8	16.8	8.0	31.6	137.4	112.2	103.3	908.9	
2003	194.2	95.1	169.8	47.9	9.6	6.5	0.0	8.1	21.4	33.8	32.0	127.0	745.5	
2004	248.6	120.6	86.7	46.9	2.9	1.2	5.2	13.8	65.1	25.5	86.2	152.3	855.1	
2005	72.5	179.9	122.8	33.4	0.3	0.0	0.0	3.6	5.5	118.1	99.0	74.6	709.9	
2006	176.7	61.4	111.6	48.8	0.0	1.4	0.0	2.0	5.5	81.5	97.2	154.1	740.4	
2007	110.4	67.8	169.2	76.7	15.4	0.0	0.5	0.3	35.1	26.3	88.4	97.2	687.4	
2008	168.8	103.1	58.7	8.1	2.9	0.9	0.0	0.5	2.7	55.3	55.6	186.2	642.9	
2009	97.9	103.8	97.8	49.1	5.7	0.0	1.1	0.1	32.2	37.6	118.5	121.7	665.5	
2010	195.6	103.9	89.3	71.9	18.2	0.0	0.0	0.5	0.6	32.5	39.7	79.9	632.1	
2011	82.3	143.5	134.2	75.3	12.2	2.7	9.2	1.7	21.4	42.5	103.3	145.8	774.2	
2012	148.8	135.3	173.7	87.9	6.1	0.0	0.7	0.0	5.2	24.8	63.6	177.6	823.7	
2013	154.5	122.9	116.4	27.4	9.5	13.7	1.7	6.3	10.4	72.4	55.3	176.6	767.1	
2014	139.3	114.5	83.6	20.6	1.3	0.0	0.4	9.2	33.8	110.3	63.0	120.1	695.9	
2015	167.9	70.8	92.6	89.5	4.4	0.8	7.6	2.2	40.7	35.7	64.4	155.0	731.7	
2016	84.2	138.5	43.4	97.0	1.9	0.5	1.9	6.1	18.4	60.3	60.9	87.7	600.7	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	148.9	107.5	114.0	55.8	7.0	4.3	2.1	5.7	19.7	63.9	89.0	112.7	730.7	
DESV.STD	42.6	39.6	44.7	35.9	6.8	8.3	4.6	7.2	16.6	66.0	77.8	39.0	199.8	
MIN	72.5	38.9	33.4	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	5.5	54.4	469.8	
MAX	248.6	196.6	201.0	162.5	25.5	38.2	20.6	34.2	65.1	392.7	485.5	203.3	1617.1	
MEDIANA	150.0	103.4	116.8	48.4	4.5	1.1	0.1	3.3	13.2	44.1	80.4	106.0	697.3	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	: QUILLISANI							Tipo	: CO					
Longitud Oeste	: 70°45'00"							Región	: PUNO					
Latitud Sur	: 15°23'00"							Provincia	: LAMPA					
Altitud (msnm)	: 4600							Distrito	: PARATIA					
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	187.1	187.1	196.8	80.8	0.5	0.0	0.2	31.8	22.0	47.5	62.2	160.1	976.0	
1982	212.3	106.7	135.9	40.2	0.4	0.4	0.2	6.9	64.7	87.1	186.2	7.3	848.4	
1983	62.2	27.3	3.7	3.2	4.7	2.6	0.3	0.6	2.6	6.3	7.4	37.2	158.1	
1984	162.9	253.7	133.5	26.0	8.6	0.5	1.8	10.6	0.4	120.5	176.3	230.8	1125.6	
1985	99.2	275.4	127.8	148.3	30.0	14.2	0.1	0.7	7.7	13.9	135.9	206.9	1060.1	
1986	123.3	307.3	276.5	80.3	9.7	0.0	0.3	4.1	13.3	2.7	23.5	207.3	1048.4	
1987	133.0	34.0	104.3	18.6	0.8	7.6	25.1	1.4	3.8	33.3	102.6	77.9	542.2	
1988	213.7	115.0	229.5	87.5	4.8	0.0	0.2	0.0	4.6	23.9	2.6	74.9	756.7	
1989	137.9	118.4	198.0	30.3	6.0	1.3	1.7	4.9	3.2	12.8	60.1	94.1	668.7	
1990	130.9	93.9	99.1	16.5	9.8	2.9	0.2	3.8	3.0	74.1	93.0	118.8	646.0	
1991	131.6	123.1	132.4	29.8	10.2	2.2	0.7	0.1	14.7	36.8	55.8	100.4	637.9	
1992	105.9	99.8	18.7	19.5	0.2	0.7	0.3	10.1	0.3	37.3	63.0	129.2	485.1	
1993	148.4	82.0	148.2	51.7	4.3	0.4	0.3	8.6	11.8	49.7	98.7	245.5	849.5	
1994	240.8	255.6	174.3	53.0	6.0	0.0	1.2	0.4	9.5	15.2	79.4	140.3	975.6	
1995	108.0	115.4	125.3	23.3	6.7	0.0	0.4	1.9	22.5	23.7	73.4	116.8	617.5	
1996	213.9	173.2	97.3	51.0	10.0	0.0	1.0	6.5	11.2	15.6	62.4	201.6	843.7	
1997	171.5	238.0	112.0	17.1	7.0	0.0	1.3	7.6	20.8	25.1	79.9	121.5	801.8	
1998	223.0	214.1	96.5	22.2	0.2	0.2	0.2	1.8	0.9	37.3	87.4	98.1	781.8	
1999	122.9	196.1	286.3	75.1	7.6	0.0	0.4	1.9	19.4	88.3	17.2	132.9	948.3	
2000	180.7	231.4	202.0	24.4	9.0	0.8	0.6	4.4	13.3	63.2	16.0	192.8	938.5	
2001	285.0	239.6	238.1	35.4	13.8	0.3	2.4	4.0	12.5	27.4	36.8	97.7	993.1	
2002	122.1	277.7	141.3	47.0	10.2	0.3	5.3	4.0	15.2	60.8	86.7	189.2	959.7	
2003	151.1	215.4	260.5	26.1	6.8	0.6	0.4	3.5	16.4	16.4	17.1	167.0	881.4	
2004	191.6	206.3	120.3	30.3	2.6	0.1	3.8	8.0	21.2	18.5	65.9	136.2	804.9	
2005	116.0	216.5	125.9	42.5	0.3	0.0	0.2	1.9	11.1	27.5	73.1	199.1	814.0	
2006	161.6	153.2	209.0	34.1	2.8	0.1	0.1	3.8	17.1	41.3	92.1	126.3	841.4	
2007	126.4	187.3	295.9	50.3	7.9	0.0	2.8	1.8	22.9	30.8	71.7	127.1	925.0	
2008	258.8	147.0	110.7	6.7	4.1	0.2	0.2	1.7	2.2	39.8	44.1	220.2	835.6	
2009	116.8	240.5	124.2	27.5	5.1	0.0	2.3	1.3	21.0	24.3	86.8	157.5	807.3	
2010	184.2	222.0	103.3	29.6	6.9	0.0	0.3	2.1	1.4	29.0	69.5	205.4	853.7	
2011	130.0	285.0	203.1	36.7	6.5	0.0	3.3	3.3	15.9	23.0	71.1	219.4	997.5	
2012	216.1	246.7	234.5	55.6	4.6	0.0	0.8	2.1	14.4	29.9	63.8	236.4	1104.8	
2013	120.7	197.9	179.0	10.1	7.9	1.0	0.9	4.3	1.4	41.1	71.8	190.4	826.5	
2014	140.8	158.4	176.8	40.3	4.5	0.0	1.1	3.8	30.8	41.6	43.2	118.7	760.0	
2015	182.3	132.8	111.1	46.5	6.7	0.3	2.9	3.2	17.4	17.7	63.0	115.9	699.8	
2016	88.0	230.3	101.1	32.4	3.8	0.5	2.8	4.5	1.5	30.1	49.3	112.9	657.1	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	158.4	183.4	156.5	40.3	6.4	1.0	1.8	4.5	13.1	36.5	69.1	147.6	818.7	
DESV.STD	50.0	70.1	67.8	27.2	5.2	2.6	4.1	5.3	11.8	24.5	39.3	56.8	187.7	
MIN	62.2	27.3	3.7	3.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.3	2.7	2.6	7.3	158.1	
MAX	285.0	307.3	295.9	148.3	30.0	14.2	25.1	31.8	64.7	120.5	186.2	245.5	1125.6	
MEDIANA	144.6	197.0	134.7	33.2	6.3	0.2	0.7	3.6	12.9	30.0	67.7	134.6	838.5	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	SANTAROSA							Tipo	:	CO			
Longitud Oeste	:	70°47'11.5"							Región	:	PUNO			
Latitud Sur	:	14°37'25.5"							Provincia	:	MELGAR			
Altitud (msnm)	:	3966							Distrito	:	SANTAROSA			
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	198.3	149.7	178.7	71.9	5.5	1.9	0.0	16.2	32.5	77.8	72.1	149.1	953.8	
1982	174.0	77.7	143.7	61.6	0.5	1.0	0.0	0.5	43.2	103.5	156.8	70.7	833.3	
1983	75.9	74.3	75.2	47.0	6.0	0.2	0.2	0.2	13.1	27.1	30.8	104.6	454.5	
1984	216.5	184.6	176.1	27.8	14.4	0.7	2.1	1.5	2.3	224.3	278.3	198.0	1326.7	
1985	132.2	163.1	150.8	131.6	23.8	22.1	0.0	0.9	49.3	26.3	168.3	186.7	1055.2	
1986	139.0	203.9	193.1	104.8	9.5	0.1	1.1	8.2	42.4	5.3	81.8	176.7	965.8	
1987	169.0	83.9	87.2	37.8	2.3	0.8	10.1	1.2	3.5	14.0	129.2	101.8	640.7	
1988	184.2	91.1	195.8	72.5	22.5	0.2	0.1	0.1	12.9	43.4	7.4	118.4	748.6	
1989	165.6	102.0	131.1	69.8	6.8	2.5	0.6	34.1	38.8	37.1	52.2	97.3	738.0	
1990	198.3	131.7	153.4	55.0	8.2	35.3	0.0	0.8	7.1	89.8	64.2	138.9	882.6	
1991	172.4	97.2	131.2	36.1	25.5	28.9	0.0	0.2	2.5	47.9	33.3	96.7	672.0	
1992	108.0	75.5	43.0	8.2	0.2	2.8	0.1	29.0	0.7	51.3	98.3	87.1	504.1	
1993	211.2	67.9	135.0	62.2	0.3	10.2	0.3	24.1	27.0	90.2	138.5	147.5	914.4	
1994	247.7	163.7	189.5	71.8	0.7	0.3	0.0	3.9	6.7	40.9	90.0	157.0	972.2	
1995	128.7	125.9	156.3	28.1	4.9	0.2	0.2	0.0	3.4	27.2	119.8	116.4	711.2	
1996	184.1	161.2	139.5	53.8	3.2	0.1	4.4	7.9	9.3	18.6	98.6	145.1	825.8	
1997	222.6	174.7	239.0	48.3	5.6	0.1	0.5	17.9	48.1	55.6	158.0	151.1	1121.4	
1998	137.4	118.0	147.2	30.8	0.1	2.6	0.0	3.2	8.2	110.9	109.0	57.0	724.3	
1999	129.1	168.4	244.1	87.5	9.3	0.3	0.0	0.2	29.2	59.6	24.2	91.9	843.7	
2000	185.3	152.0	120.5	17.5	6.8	6.1	3.7	6.3	10.2	154.6	23.1	143.8	829.8	
2001	241.4	161.7	130.8	31.8	31.2	0.7	6.6	5.6	17.2	40.5	26.6	68.1	762.0	
2002	150.9	173.8	124.4	89.0	29.3	2.6	14.4	5.0	29.5	114.4	101.5	122.1	956.9	
2003	157.5	143.1	203.9	42.2	9.7	3.7	0.1	11.2	18.4	31.3	29.7	112.6	763.5	
2004	227.0	122.1	95.5	51.0	2.8	2.6	3.5	20.0	46.4	20.4	79.5	135.7	806.5	
2005	77.9	197.9	119.8	37.4	0.4	0.1	0.1	4.3	0.5	86.6	92.4	100.2	717.5	
2006	211.5	100.2	115.9	47.9	0.8	5.2	0.0	4.9	9.2	52.5	89.7	204.2	841.8	
2007	107.5	96.6	224.7	71.0	8.7	0.2	2.9	0.1	39.5	42.0	83.4	86.6	763.3	
2008	161.9	87.7	73.1	4.7	4.4	2.4	0.0	1.9	0.9	61.2	56.1	200.0	654.3	
2009	114.7	121.4	91.0	35.2	0.5	0.1	0.4	0.1	17.0	36.9	126.7	137.5	681.5	
2010	236.6	132.6	126.4	37.6	11.5	0.2	0.1	0.7	0.5	20.7	46.8	119.3	732.9	
2011	110.4	185.3	165.2	58.9	13.1	4.0	7.8	2.0	42.0	41.5	57.6	152.2	839.9	
2012	159.7	187.4	176.1	101.9	0.6	0.3	0.1	0.0	16.2	28.9	73.0	186.5	930.6	
2013	171.5	150.7	104.9	15.1	9.1	12.0	2.3	6.6	2.6	69.2	67.3	168.8	780.1	
2014	157.5	145.8	87.4	31.2	2.1	0.2	2.0	16.7	65.3	90.2	43.6	140.5	782.4	
2015	198.4	89.0	124.2	88.1	1.4	1.0	5.1	4.2	36.7	42.9	49.6	197.1	837.7	
2016	110.7	176.8	85.7	87.8	0.7	0.8	5.9	11.3	14.8	68.2	42.2	83.1	688.1	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	166.0	134.4	141.1	54.3	7.8	4.2	2.1	7.0	20.8	59.8	83.3	132.0	812.7	
DESV.STD	44.9	39.5	47.2	28.5	8.5	8.0	3.3	8.7	17.7	42.7	52.6	40.1	160.2	
MIN	75.9	67.9	43.0	4.7	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5	5.3	7.4	57.0	454.5	
MAX	247.7	203.9	244.1	131.6	31.2	35.3	14.4	34.1	65.3	224.3	278.3	204.2	1326.7	
MEDIANA	167.3	137.9	133.1	49.6	5.5	0.9	0.2	4.0	15.5	45.6	76.2	136.6	794.5	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A1								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°50'47.5"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	14°29'23.8"								Provincia	:	MELGAR	
Altitud (msnm)	:	4908								Distrito	:	SANTA ROSA	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	210.1	187.5	206.2	72.8	9.8	2.0	1.3	22.3	18.4	83.3	103.2	136.0	1053.1
1982	207.1	93.0	154.4	65.5	1.5	1.4	1.7	2.7	26.1	92.9	162.1	75.0	883.4
1983	96.5	100.8	94.2	42.4	11.3	1.0	1.9	1.4	5.8	26.9	38.2	91.0	511.4
1984	210.8	206.2	177.1	37.1	19.0	2.6	5.8	5.0	1.9	201.9	325.0	163.2	1355.6
1985	132.3	184.6	142.6	116.1	34.3	20.2	1.1	1.2	33.5	26.6	199.3	144.7	1036.5
1986	153.0	209.8	200.3	115.4	12.3	0.5	3.9	9.5	23.8	8.2	86.8	168.8	992.2
1987	198.0	102.3	86.2	37.7	4.8	2.1	31.2	3.0	3.8	27.6	172.8	105.0	774.4
1988	194.4	114.8	227.0	96.7	38.0	0.5	1.3	0.9	7.9	48.8	13.7	106.1	850.0
1989	184.1	121.3	146.7	63.8	15.8	4.9	2.5	36.9	19.2	36.7	62.3	94.0	788.1
1990	224.3	159.6	130.1	63.3	14.1	40.0	1.2	2.4	5.4	85.6	89.6	136.8	952.5
1991	140.4	123.4	134.0	39.3	33.2	31.7	1.4	0.7	3.3	48.8	43.9	79.5	679.7
1992	127.9	101.9	57.9	12.4	1.1	5.4	1.8	36.4	1.3	53.8	112.8	69.7	582.4
1993	208.2	91.8	143.3	87.3	1.6	8.1	3.3	26.0	16.3	83.4	140.0	143.9	953.2
1994	223.3	206.6	202.0	90.3	5.2	1.5	1.4	4.0	5.7	48.4	117.6	147.1	1053.2
1995	133.6	142.9	173.0	37.2	8.1	1.0	2.5	0.7	4.4	31.2	135.8	100.8	770.9
1996	193.6	184.0	167.2	64.4	11.6	0.6	7.7	12.8	8.8	32.9	116.1	142.2	941.8
1997	172.4	205.0	265.8	54.7	9.0	0.4	3.9	24.4	20.9	48.6	159.4	133.3	1097.8
1998	159.1	155.2	152.1	24.8	0.6	3.4	1.1	4.7	4.3	103.6	115.7	67.4	792.1
1999	136.9	213.2	224.3	92.2	12.0	1.8	1.6	0.7	21.6	49.7	36.9	107.9	899.0
2000	192.2	175.5	123.0	25.8	10.1	10.2	8.7	8.2	7.3	137.6	33.4	130.4	862.5
2001	283.0	177.3	151.0	48.1	41.7	1.5	16.8	9.8	11.0	49.1	48.2	66.3	903.8
2002	141.0	211.4	150.9	89.6	31.1	3.1	35.0	7.7	23.6	99.6	126.7	119.3	1039.0
2003	172.3	172.4	194.4	48.8	19.6	6.7	1.9	15.4	7.9	36.0	40.7	123.0	839.2
2004	209.8	147.7	110.4	59.0	6.2	5.5	10.8	23.8	25.6	26.3	100.5	121.0	846.6
2005	80.4	224.6	134.6	42.7	2.9	0.5	2.2	4.2	1.0	75.9	114.2	101.0	784.2
2006	219.3	136.0	107.7	73.9	2.9	7.7	1.5	10.0	8.1	56.3	129.6	160.5	913.6
2007	126.4	120.4	231.2	73.2	13.1	0.9	9.8	0.9	19.1	51.0	102.1	88.4	836.5
2008	180.1	123.7	102.6	12.2	9.1	4.4	1.6	3.5	1.4	72.2	67.1	172.6	750.5
2009	124.5	151.6	95.2	35.4	5.6	0.5	4.7	1.0	10.2	41.2	158.4	129.4	757.6
2010	257.1	154.4	145.5	42.5	13.9	1.2	1.8	3.2	0.8	33.5	49.8	134.1	837.7
2011	125.6	207.9	167.3	83.7	16.2	5.1	15.5	3.6	27.3	48.2	61.8	151.6	913.8
2012	189.8	232.1	174.2	95.3	2.4	2.3	2.1	0.9	11.6	37.4	89.4	175.2	1012.6
2013	204.3	186.0	112.7	22.0	18.0	14.4	4.7	11.5	1.6	70.2	91.7	170.0	907.1
2014	181.6	159.4	105.4	46.3	6.4	1.3	5.3	16.2	34.1	76.8	52.6	151.5	836.8
2015	198.7	120.5	131.0	105.5	6.6	2.8	14.3	8.8	17.6	45.4	82.2	171.9	905.2
2016	122.8	222.3	89.4	94.5	3.1	2.2	15.4	12.6	11.7	77.3	50.0	85.3	786.6
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	175.4	161.9	150.3	61.4	12.6	5.5	6.3	9.4	12.6	60.4	100.8	124.0	880.6
DESV.STD	44.0	41.8	46.5	28.4	10.7	8.5	7.9	9.8	9.6	35.8	58.5	32.8	148.7
MIN	80.4	91.8	57.9	12.2	0.6	0.4	1.1	0.7	0.8	8.2	13.7	66.3	511.4
MAX	283.0	232.1	265.8	116.1	41.7	40.0	35.0	36.9	34.1	201.9	325.0	175.2	1355.6
MEDIANA	182.8	159.5	146.1	61.1	9.9	2.2	2.5	4.8	9.5	48.9	96.1	129.9	872.9

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	A2												
Longitud Oeste	:	70°54'58.4"												
Latitud Sur	:	14°36'14.1"												
Altitud (msnm)	:	4720												
Tipo	:	Est. Virtual												
Región	:	PUNO												
Provincia	:	MELGAR												
Distrito	:	SANTA ROSA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	185.9	213.0	159.2	86.5	4.4	1.2	0.1	17.3	33.3	44.8	53.7	155.1	954.4	
1982	169.1	81.2	136.0	85.5	0.4	0.8	0.3	1.0	55.9	62.4	121.0	79.5	793.0	
1983	68.7	85.9	72.6	52.2	4.0	0.3	0.3	0.5	14.5	15.0	16.7	103.4	434.1	
1984	191.0	224.5	152.1	35.8	7.5	1.2	2.4	2.1	3.4	128.1	174.1	196.6	1118.9	
1985	97.1	192.4	101.4	152.4	14.6	23.0	0.3	0.9	57.4	14.9	103.9	179.0	937.3	
1986	123.9	189.2	162.3	110.4	6.0	0.0	1.8	6.3	47.8	3.9	48.2	195.9	895.8	
1987	156.2	97.9	78.6	50.8	1.7	0.9	11.7	1.5	7.2	12.6	87.1	108.1	614.3	
1988	176.7	103.7	179.7	118.7	12.4	0.0	0.2	0.3	17.3	25.1	6.3	121.8	762.0	
1989	153.4	126.6	125.0	79.3	5.6	2.4	1.1	23.2	32.6	19.1	33.9	92.7	694.8	
1990	170.2	138.8	119.8	64.6	7.1	27.5	0.1	0.9	10.9	58.3	52.8	155.2	806.0	
1991	122.4	119.6	136.9	46.1	14.2	21.7	0.2	0.1	4.0	33.1	27.1	97.0	622.5	
1992	90.3	89.3	44.5	11.6	0.0	3.2	0.5	26.1	1.8	28.9	60.5	86.2	442.9	
1993	172.5	88.1	107.3	86.6	0.2	5.1	0.7	21.0	27.6	47.1	84.4	162.8	803.6	
1994	219.3	217.0	166.1	87.9	1.0	0.4	0.1	1.8	9.0	21.6	62.2	168.0	954.5	
1995	111.8	143.8	146.1	37.8	2.9	0.2	0.6	0.2	6.4	18.8	62.5	124.7	655.8	
1996	162.6	206.8	119.9	71.2	2.8	0.1	3.0	8.0	14.8	13.6	57.6	171.7	832.1	
1997	154.3	197.0	172.2	66.5	3.8	0.0	1.3	17.9	49.0	24.8	94.4	150.8	931.8	
1998	149.8	151.5	98.2	37.9	0.0	2.0	0.1	2.7	9.6	55.9	67.9	79.8	655.4	
1999	128.5	183.0	184.5	112.6	6.2	0.2	0.4	0.4	40.2	33.3	17.4	120.2	826.8	
2000	169.2	163.5	102.3	26.8	6.6	6.6	4.2	6.1	13.0	80.6	16.1	144.7	739.6	
2001	232.8	177.2	128.8	46.5	20.3	0.6	9.0	4.7	21.5	15.5	11.8	74.3	743.0	
2002	119.2	193.7	122.7	95.7	19.1	1.9	14.9	4.8	37.7	65.0	72.7	131.4	878.9	
2003	132.2	156.7	160.4	46.7	7.3	3.4	0.2	9.5	18.9	17.7	23.7	126.1	702.7	
2004	188.9	129.8	87.6	60.9	2.2	3.2	4.7	18.1	49.5	13.4	53.1	136.2	747.6	
2005	73.4	220.4	107.0	51.3	0.2	0.0	0.4	2.8	1.2	44.3	62.4	109.3	672.7	
2006	197.2	130.4	97.8	59.6	0.5	4.8	0.2	5.9	14.2	28.6	71.7	178.2	789.1	
2007	98.0	113.0	198.1	74.2	6.3	0.3	4.5	0.1	39.5	24.7	53.8	102.4	714.9	
2008	159.9	113.0	75.2	6.9	3.4	2.0	0.2	1.9	1.6	39.5	30.3	204.7	638.9	
2009	95.3	141.7	80.7	49.7	2.0	0.1	1.1	0.2	20.4	21.7	82.5	139.3	634.7	
2010	203.1	155.6	109.6	52.0	5.5	0.3	0.3	1.0	1.4	15.0	30.4	144.8	718.9	
2011	110.3	203.6	133.4	97.1	7.2	2.5	8.2	3.1	49.7	20.6	35.8	174.5	845.8	
2012	165.8	203.5	134.6	134.5	0.4	0.6	0.2	0.1	20.6	19.9	45.4	194.6	920.2	
2013	146.7	167.8	88.6	17.6	5.4	12.2	2.7	7.5	2.5	38.1	46.7	182.3	718.1	
2014	135.4	142.3	82.0	48.0	1.7	0.2	2.5	11.5	81.5	52.2	27.7	140.6	725.6	
2015	167.4	109.7	96.0	114.7	1.5	0.8	6.9	5.4	37.3	26.2	41.0	180.6	787.4	
2016	92.5	209.4	72.1	89.7	0.6	0.8	7.0	9.8	16.2	40.9	29.3	88.6	657.0	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	147.0	155.0	120.5	68.5	5.1	3.6	2.6	6.2	24.1	34.0	54.6	138.9	760.3	
DESV.STD	40.3	43.6	36.5	33.8	5.1	6.6	3.6	7.2	19.7	23.6	33.5	37.7	137.4	
MIN	68.7	81.2	44.5	6.9	0.0	0.0	0.1	0.1	1.2	3.9	6.3	74.3	434.1	
MAX	232.8	224.5	198.1	152.4	20.3	27.5	14.9	26.1	81.5	128.1	174.1	204.7	1118.9	
MEDIANA	153.8	153.6	119.8	62.7	3.9	0.9	0.6	2.9	18.1	25.6	53.0	139.9	745.3	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	A3												
Longitud Oeste	:	71°1'42.2"												
Latitud Sur	:	14°40'46.1"												
Altitud (msnm)	:	4173												
Tipo	:	Est. Virtual												
Región	:	PUNO												
Provincia	:	MELGAR												
Distrito	:	MACARI												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	180.9	205.7	138.5	84.5	5.2	0.9	0.1	19.6	34.9	32.6	55.9	144.5	903.4	
1982	158.1	77.3	130.4	85.0	0.7	0.6	0.5	1.7	55.5	52.5	136.8	75.7	774.8	
1983	65.7	89.1	71.7	53.3	4.8	0.4	0.3	0.9	16.3	11.9	16.4	89.2	420.0	
1984	177.3	223.3	152.2	35.2	7.7	1.4	2.3	3.3	4.1	102.7	183.9	196.7	1090.1	
1985	87.3	182.6	101.3	149.1	17.5	20.2	0.2	0.8	60.9	11.3	112.4	168.8	912.4	
1986	116.4	162.0	160.9	104.7	7.4	0.0	1.9	6.5	49.0	3.4	48.7	199.1	860.0	
1987	152.4	92.3	69.0	45.1	2.5	0.9	12.9	2.0	9.0	13.6	88.6	107.0	595.3	
1988	170.1	105.4	173.4	113.7	12.6	0.0	0.2	0.6	18.2	20.0	7.6	115.6	737.4	
1989	146.4	131.0	129.1	74.7	7.8	2.1	0.7	20.6	29.0	14.2	34.3	85.0	674.9	
1990	155.3	129.8	98.5	56.3	9.5	23.2	0.1	1.4	13.3	53.5	63.1	141.1	745.1	
1991	110.3	123.8	129.6	42.9	16.0	18.6	0.3	0.3	5.8	30.4	32.2	88.1	598.2	
1992	85.3	89.4	43.0	11.1	0.2	3.1	0.6	27.6	2.6	22.8	60.8	78.5	425.0	
1993	171.2	83.1	123.8	79.1	0.5	3.5	0.9	23.1	27.7	42.4	91.9	151.9	799.3	
1994	187.9	201.6	153.6	80.4	1.9	0.4	0.0	1.7	10.8	16.2	65.7	166.0	886.2	
1995	105.1	135.4	121.5	39.3	3.3	0.3	0.6	0.4	9.0	18.7	64.5	119.7	617.8	
1996	147.7	188.0	104.8	69.2	3.5	0.0	2.0	8.7	19.3	14.0	60.2	160.8	778.1	
1997	138.2	185.1	163.5	65.2	4.4	0.0	1.5	18.3	45.0	19.2	96.8	144.5	881.7	
1998	146.3	157.9	91.3	29.1	0.0	1.2	0.1	2.9	8.8	45.0	67.0	80.1	629.6	
1999	124.5	171.1	163.0	110.2	6.1	0.3	0.8	0.6	43.9	26.0	20.0	129.9	796.5	
2000	154.1	169.2	100.9	27.3	8.4	6.3	4.1	6.3	13.0	62.7	17.2	140.8	710.2	
2001	225.5	159.5	135.2	52.2	22.3	0.6	8.8	5.4	22.1	12.4	12.9	74.4	731.4	
2002	112.2	186.0	117.3	87.0	22.1	1.6	16.1	5.1	40.9	54.6	78.8	133.2	854.9	
2003	123.9	151.6	144.8	41.7	9.1	3.2	0.3	9.8	18.0	14.4	26.7	132.8	676.3	
2004	172.9	126.8	85.3	57.7	2.8	3.4	5.4	20.1	51.3	11.4	55.9	135.5	728.4	
2005	72.5	208.7	104.5	50.7	0.5	0.0	0.4	2.7	2.2	35.1	66.9	110.4	654.7	
2006	182.3	134.5	94.7	58.7	0.9	3.9	0.3	6.6	16.5	24.1	83.5	162.2	768.2	
2007	96.3	109.1	186.2	64.3	7.0	0.2	4.8	0.4	36.9	21.3	55.2	107.8	689.5	
2008	159.6	121.1	79.2	7.3	4.3	1.6	0.3	2.1	2.2	34.7	31.0	194.9	638.3	
2009	88.1	136.1	79.9	50.9	3.3	0.0	1.9	0.4	21.2	18.5	90.1	132.7	623.0	
2010	194.9	148.6	105.5	54.4	5.7	0.3	0.3	1.5	2.2	15.7	31.2	144.9	705.1	
2011	111.9	191.4	119.7	105.4	7.2	1.8	7.7	3.9	53.4	15.7	37.8	177.6	833.6	
2012	167.3	191.1	122.5	117.9	0.9	0.8	0.3	0.3	20.7	17.7	44.5	191.8	875.8	
2013	131.7	160.8	88.4	15.2	6.0	11.5	2.5	9.0	2.7	32.6	51.7	175.0	687.1	
2014	122.1	119.6	79.0	47.3	2.9	0.2	2.2	10.2	81.0	40.3	29.1	133.5	667.3	
2015	153.8	110.0	89.1	109.7	2.9	0.7	7.5	6.9	36.2	21.9	46.8	162.4	747.9	
2016	79.7	204.7	66.0	76.7	1.4	0.8	6.8	10.0	16.1	32.9	31.4	86.1	612.6	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	138.2	149.0	114.4	65.3	6.1	3.2	2.7	6.7	25.0	28.2	58.3	134.4	731.4	
DESV.STD	38.0	39.9	33.5	32.1	5.7	5.7	3.8	7.4	19.6	19.0	35.9	36.7	131.4	
MIN	65.7	77.3	43.0	7.3	0.0	0.0	0.0	0.3	2.2	3.4	7.6	74.4	420.0	
MAX	225.5	223.3	186.2	149.1	22.3	23.2	16.1	27.6	81.0	102.7	183.9	199.1	1090.1	
MEDIANA	146.3	150.1	111.4	58.2	4.6	0.9	0.8	3.6	18.8	21.6	55.6	134.5	729.9	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A4								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°52'2.2"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	14°44'15.8"								Provincia	:	MELGAR	
Altitud (msnm)	:	4006								Distrito	:	MACARI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	181.1	180.9	178.5	67.6	4.7	1.0	0.0	16.4	25.0	42.8	56.0	136.0	890.1
1982	155.2	79.4	156.1	69.3	0.2	0.6	0.0	0.5	45.1	59.2	139.8	68.1	773.4
1983	58.4	72.9	80.9	46.5	3.4	0.0	0.0	0.2	9.2	13.8	20.6	89.0	394.9
1984	206.9	211.2	191.4	29.1	9.5	0.3	1.5	1.4	2.0	114.2	201.8	172.2	1141.4
1985	108.0	169.0	121.6	117.0	16.4	18.5	0.0	1.0	43.3	13.6	130.5	157.1	896.0
1986	121.6	165.3	183.6	96.7	7.9	0.0	1.2	6.0	36.4	2.5	54.5	168.2	843.9
1987	140.7	84.7	92.2	34.5	1.5	0.6	8.3	1.1	3.8	7.9	94.8	86.3	556.5
1988	178.2	91.4	209.6	81.4	14.1	0.0	0.0	0.1	12.6	19.4	5.6	110.3	722.8
1989	151.8	100.0	138.9	66.0	4.9	1.4	0.8	25.4	27.1	17.8	42.1	85.4	661.7
1990	168.2	113.3	142.7	50.5	7.3	23.9	0.0	0.5	7.8	58.5	64.0	119.1	755.9
1991	143.0	95.9	155.3	34.2	18.1	19.2	0.0	0.0	2.0	29.6	30.2	86.6	614.0
1992	90.6	79.6	54.6	12.4	0.0	1.5	0.1	29.1	0.5	27.6	71.9	85.7	453.5
1993	168.3	72.2	138.3	58.1	0.1	5.7	0.1	24.0	18.5	50.9	113.8	131.9	781.8
1994	217.5	183.2	172.2	66.1	0.3	0.0	0.0	2.1	5.9	17.3	75.3	137.4	877.4
1995	111.8	139.1	162.2	22.7	2.5	0.0	0.3	0.1	2.9	14.8	68.8	107.3	632.5
1996	160.2	164.1	138.8	58.0	1.9	0.0	2.2	6.6	8.4	10.4	63.4	140.7	754.7
1997	172.7	190.3	227.7	55.1	3.8	0.0	0.3	16.8	38.7	23.1	106.4	126.8	961.7
1998	137.0	151.9	132.9	27.8	0.0	1.3	0.0	2.5	7.8	51.0	86.5	61.8	660.5
1999	131.0	169.5	217.7	101.9	7.7	0.0	0.0	0.6	26.8	37.6	21.3	98.6	812.8
2000	177.0	169.0	126.1	17.5	8.8	4.2	3.7	6.6	9.0	75.0	17.7	129.6	744.2
2001	216.5	152.5	152.0	32.4	21.1	0.3	5.2	4.0	14.3	11.4	10.4	65.1	685.3
2002	130.1	182.3	136.9	81.0	24.7	1.3	11.5	6.0	26.0	60.3	87.9	117.7	865.6
2003	137.6	145.4	199.0	35.0	6.1	2.2	0.0	9.7	19.2	14.9	27.4	101.2	697.8
2004	196.7	121.1	104.5	45.1	2.1	1.9	2.9	17.0	39.5	10.9	60.3	131.4	733.3
2005	76.6	219.2	121.0	41.2	0.0	0.0	0.0	3.6	0.1	49.7	72.6	95.4	679.4
2006	193.7	119.8	133.8	33.5	0.3	2.9	0.0	5.0	8.6	26.8	80.7	172.5	777.8
2007	97.8	104.6	239.8	70.8	6.2	0.0	3.1	0.0	30.7	18.7	62.9	87.3	721.8
2008	162.8	100.5	72.7	3.5	3.2	1.0	0.0	1.8	0.5	31.8	34.6	200.1	612.6
2009	95.1	128.3	114.2	45.2	1.0	0.0	0.3	0.1	16.3	17.9	96.9	127.8	643.1
2010	191.3	143.9	118.1	50.8	8.0	0.0	0.0	0.3	0.4	11.9	46.0	118.6	689.3
2011	107.9	199.3	163.9	73.9	9.1	2.1	7.7	4.0	34.3	18.8	46.5	165.3	832.8
2012	159.4	186.6	161.6	102.6	0.2	0.0	0.0	0.0	13.0	16.2	60.7	177.2	877.5
2013	141.5	154.2	101.0	13.1	5.0	11.7	3.3	6.9	1.7	35.6	51.5	164.3	689.8
2014	132.5	146.6	94.4	35.2	1.5	0.0	1.8	16.9	63.4	56.1	37.8	116.2	702.5
2015	173.7	92.9	122.0	87.2	1.4	0.2	4.5	4.5	30.8	24.2	44.0	158.4	743.6
2016	87.4	183.1	93.7	82.1	0.4	0.1	5.6	11.0	10.3	36.0	36.8	77.8	624.3
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	146.7	140.6	143.1	54.0	5.7	2.8	1.8	6.4	17.8	31.3	64.5	121.5	736.3
DESV.STD	39.6	41.9	43.5	27.7	6.2	5.8	2.8	7.9	15.6	22.8	39.4	35.3	136.3
MIN	58.4	72.2	54.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.5	5.6	61.8	394.9
MAX	217.5	219.2	239.8	117.0	24.7	23.9	11.5	29.1	63.4	114.2	201.8	200.1	1141.4
MEDIANA	147.4	146.0	138.6	50.7	3.6	0.4	0.2	3.8	12.8	23.6	60.5	118.9	728.1

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A5								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°39'14.4"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	14°40'19.8"								Provincia	:	MELGAR	
Altitud (msnm)	:	4395								Distrito	:	SANTA ROSA	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	205.5	115.8	162.4	75.9	5.0	1.9	0.0	12.5	51.0	90.1	91.7	136.1	948.0
1982	179.0	61.4	142.9	71.3	0.3	0.6	0.0	0.9	55.5	126.9	180.6	70.3	889.8
1983	97.2	59.8	74.7	57.7	5.6	0.5	0.0	0.0	15.2	34.3	42.1	100.9	487.9
1984	221.6	136.4	158.1	34.0	13.7	1.2	0.9	2.0	4.2	308.6	385.0	181.6	1447.2
1985	148.0	120.5	169.6	149.4	22.9	18.6	0.0	0.5	73.1	31.5	198.3	177.0	1109.4
1986	147.1	172.1	184.1	132.3	7.4	0.0	0.4	6.1	56.9	4.2	72.1	137.6	920.4
1987	166.7	54.4	59.6	34.8	2.5	1.1	12.1	1.0	3.9	20.6	145.4	98.0	600.0
1988	170.6	74.6	167.2	71.0	21.6	0.0	0.0	0.0	17.9	53.8	8.9	95.8	681.4
1989	177.8	89.1	128.8	71.7	5.9	2.6	0.5	24.3	52.3	44.0	59.7	83.9	740.4
1990	196.9	81.5	89.8	47.9	5.3	33.9	0.0	1.3	9.8	113.2	88.7	98.7	767.2
1991	176.6	71.1	102.2	35.1	17.5	22.9	0.0	0.4	6.1	40.9	45.6	78.8	597.1
1992	117.5	66.5	50.6	13.2	0.1	2.6	0.0	26.1	2.3	74.0	118.1	82.0	552.8
1993	212.1	57.5	131.5	65.2	0.4	11.6	0.3	18.6	40.9	129.3	176.2	114.8	958.3
1994	190.0	102.8	179.0	81.5	1.8	0.3	0.0	3.5	11.7	52.8	108.4	136.4	868.3
1995	122.8	91.2	152.5	32.8	3.1	0.1	0.1	0.0	7.6	32.9	131.3	114.4	688.9
1996	188.2	110.1	104.3	49.7	4.8	0.0	1.8	4.5	13.2	31.6	109.7	123.0	741.1
1997	194.0	150.7	228.3	39.4	4.1	0.0	0.2	12.9	51.6	69.3	195.3	128.2	1073.9
1998	133.8	88.1	154.1	32.6	0.0	1.9	0.0	2.0	8.0	131.6	131.6	57.2	740.9
1999	120.5	136.7	181.7	103.4	7.8	0.3	0.0	0.0	42.8	71.8	39.0	78.3	782.2
2000	175.1	141.0	122.4	15.0	7.2	4.7	3.4	4.7	11.7	190.5	26.5	118.8	820.9
2001	250.3	105.1	123.9	40.6	29.0	1.3	3.9	4.7	24.3	59.9	39.5	75.9	758.3
2002	155.5	139.2	106.3	97.0	27.0	3.5	13.7	5.5	44.5	159.1	131.1	111.0	993.4
2003	182.4	106.3	194.7	52.9	9.1	4.7	0.0	8.5	28.5	41.9	36.7	114.6	780.4
2004	245.0	103.8	94.9	56.4	3.1	2.0	3.6	15.7	72.2	28.5	97.5	137.9	860.4
2005	81.6	160.3	121.5	39.4	0.7	0.0	0.0	3.3	3.1	131.2	112.6	89.8	743.3
2006	205.4	73.0	121.3	53.4	0.5	3.1	0.0	2.9	11.8	78.7	116.9	177.5	844.7
2007	119.5	70.6	207.4	82.2	7.5	0.1	1.4	0.1	52.7	46.3	106.0	87.7	781.6
2008	170.2	78.3	67.8	7.0	4.0	1.7	0.0	1.0	3.1	76.7	69.3	185.7	664.9
2009	117.9	95.6	97.4	43.6	2.1	0.0	0.6	0.0	30.4	48.3	151.8	126.6	714.5
2010	233.8	98.6	114.8	51.0	14.2	0.1	0.0	0.5	1.4	34.2	51.7	100.9	701.4
2011	108.6	139.1	150.6	72.8	12.1	3.5	6.6	1.7	47.5	56.4	84.0	145.8	828.7
2012	163.6	143.5	178.9	97.7	2.0	0.3	0.2	0.0	16.1	36.0	85.0	174.1	897.3
2013	177.9	125.2	113.3	23.1	9.5	12.0	1.6	5.3	7.8	94.3	76.2	168.6	815.0
2014	154.5	114.7	90.2	31.3	2.1	0.1	0.8	12.1	70.8	122.0	63.3	131.3	793.2
2015	200.2	70.1	119.6	100.1	3.3	1.0	4.4	2.9	53.3	52.8	71.6	178.0	857.2
2016	110.5	144.2	71.1	102.2	1.2	0.7	3.2	7.7	25.1	88.5	59.9	84.4	698.6
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	167.2	104.1	131.0	60.1	7.3	3.9	1.7	5.4	28.6	78.0	103.0	119.5	809.7
DESV.STD	41.5	32.1	43.0	32.3	7.6	7.2	3.2	6.8	22.7	57.4	67.2	35.6	170.5
MIN	81.6	54.4	50.6	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	4.2	8.9	57.2	487.9
MAX	250.3	172.1	228.3	149.4	29.0	33.9	13.7	26.1	73.1	308.6	385.0	185.7	1447.2
MEDIANA	172.9	103.3	123.2	53.2	4.9	1.2	0.2	2.9	21.1	58.1	90.2	114.7	781.9

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A6								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°57'21.0"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	14°50'5.3"								Provincia	:	MELGAR	
Altitud (msnm)	:	4774								Distrito	:	MACARI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	187.2	204.4	133.3	66.7	4.9	0.4	0.0	22.5	23.1	42.2	52.0	172.4	909.1
1982	163.8	81.6	147.2	71.3	0.3	0.2	0.0	1.0	54.5	60.2	126.4	74.0	780.5
1983	67.2	75.6	64.2	42.2	3.8	0.0	0.0	0.6	8.9	13.7	14.5	96.3	387.0
1984	226.0	230.0	194.6	26.0	10.2	0.2	1.4	2.4	2.2	123.1	192.6	213.5	1222.1
1985	108.7	184.2	109.6	106.4	18.5	11.3	0.0	1.8	33.8	13.9	110.4	201.5	900.2
1986	153.0	171.0	170.8	88.1	7.4	0.0	1.5	6.8	36.7	2.8	40.7	225.9	904.7
1987	171.3	80.9	69.0	29.2	2.2	0.7	8.4	1.7	4.8	10.0	81.9	96.0	556.0
1988	204.2	93.9	182.1	82.5	15.6	0.0	0.0	0.5	13.2	20.7	4.9	142.9	760.6
1989	160.9	111.7	127.4	59.6	6.0	0.8	1.0	20.6	19.7	15.6	34.9	93.1	651.3
1990	184.1	95.1	90.2	39.0	10.2	17.2	0.0	1.0	9.0	71.6	68.5	160.3	746.2
1991	140.9	105.9	141.8	33.9	15.3	13.6	0.0	0.2	2.9	32.7	31.1	100.5	618.8
1992	99.2	87.4	44.8	13.1	0.1	1.0	0.3	34.4	0.7	30.5	52.1	104.6	468.3
1993	172.8	74.6	134.4	53.6	0.5	2.7	0.1	27.0	19.0	63.3	104.3	161.4	813.5
1994	198.2	183.5	141.9	58.3	0.7	0.0	0.0	1.2	6.2	13.0	65.0	152.5	820.6
1995	120.8	139.0	129.5	19.3	2.2	0.0	0.4	0.5	3.3	15.1	50.4	120.4	600.8
1996	166.7	169.0	108.5	52.6	2.9	0.0	0.7	7.4	10.6	13.8	47.0	180.4	759.5
1997	173.8	172.1	168.1	57.2	4.9	0.0	0.1	19.1	37.3	20.5	84.8	140.8	878.5
1998	165.2	176.0	93.2	24.6	0.0	0.5	0.0	2.6	6.6	47.0	73.1	93.1	681.8
1999	165.1	177.8	162.2	98.9	6.6	0.0	0.0	1.2	33.0	50.4	19.9	129.9	845.1
2000	203.8	178.4	109.6	15.7	13.0	3.1	3.7	9.4	8.8	78.1	15.4	143.3	782.3
2001	240.1	132.8	153.7	36.1	22.8	0.1	4.4	3.1	14.0	4.9	3.4	82.6	698.2
2002	137.8	174.9	121.4	59.4	27.4	0.6	11.2	7.7	25.8	68.5	79.5	139.5	853.7
2003	144.2	135.1	157.5	24.8	6.9	1.6	0.0	10.1	22.5	14.0	25.3	131.9	673.9
2004	206.3	119.1	91.4	39.4	2.7	1.7	3.1	19.7	34.9	11.4	49.4	163.4	742.6
2005	86.9	224.3	109.0	40.9	0.3	0.0	0.0	3.4	0.5	45.6	65.2	117.2	693.4
2006	221.8	132.5	136.8	27.2	0.5	2.3	0.0	7.2	11.4	27.8	76.2	187.6	831.3
2007	117.6	115.8	221.9	60.4	5.9	0.0	3.8	0.3	33.6	19.3	52.3	125.5	756.4
2008	200.0	118.5	80.6	2.0	3.8	0.6	0.0	2.4	0.6	35.1	22.7	242.5	708.5
2009	93.9	142.3	113.6	46.6	1.7	0.0	0.5	0.4	16.5	20.8	93.6	158.2	688.0
2010	199.3	158.5	97.2	52.3	7.7	0.0	0.1	0.6	0.7	17.0	43.5	162.6	739.7
2011	127.3	207.6	142.3	90.6	9.8	0.5	7.5	7.2	31.2	16.6	43.8	234.1	918.6
2012	189.5	183.4	126.4	104.2	0.5	0.0	0.0	0.3	10.0	19.8	50.9	233.4	918.4
2013	143.1	156.0	95.5	8.8	5.1	13.2	4.1	9.0	1.7	39.7	50.9	201.3	728.5
2014	132.2	121.4	80.8	33.8	1.9	0.0	1.9	14.4	71.6	69.9	31.1	125.2	684.2
2015	179.5	101.2	90.6	83.3	1.9	0.0	5.0	6.1	30.6	27.0	43.9	167.2	736.3
2016	72.8	187.2	67.1	59.8	1.1	0.0	5.5	12.1	9.0	40.1	32.3	99.6	586.7
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	159.0	144.5	122.4	50.2	6.3	2.0	1.8	7.4	18.0	33.8	56.5	149.3	751.3
DESV.STD	43.2	43.4	38.7	27.1	6.6	4.3	2.8	8.5	16.3	25.5	36.8	45.7	145.0
MIN	67.2	74.6	44.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	2.8	3.4	74.0	387.0
MAX	240.1	230.0	221.9	106.4	27.4	17.2	11.2	34.4	71.6	123.1	192.6	242.5	1222.1
MEDIANA	165.2	140.6	123.9	49.5	4.3	0.2	0.2	3.2	12.3	23.9	50.6	143.1	744.4

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A7											
Longitud Oeste	:	70°48'58.9"											
Latitud Sur	:	14°51'7.9"											
Altitud (msnm)	:	3975											
Tipo	:	Est. Virtual											
Región	:	PUNO											
Provincia	:	MELGAR											
Distrito	:	MACARI											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	195.6	156.5	160.2	62.8	3.6	0.8	0.0	18.5	21.5	44.2	54.8	149.0	867.7
1982	167.2	68.1	149.6	62.3	0.0	0.5	0.0	0.6	47.6	67.3	137.3	67.6	768.2
1983	57.3	59.9	74.4	42.3	2.2	0.0	0.0	0.3	7.7	14.9	18.4	92.5	370.0
1984	239.6	181.5	197.1	25.3	8.4	0.2	1.1	1.7	1.8	122.2	205.8	203.3	1188.1
1985	125.9	153.9	124.3	105.3	14.5	14.9	0.0	1.3	37.5	15.0	124.0	179.6	896.2
1986	147.3	143.4	186.9	87.5	6.9	0.0	1.1	5.5	34.9	2.4	47.1	194.1	857.1
1987	159.0	67.7	79.8	28.3	1.4	1.1	7.6	1.3	3.7	8.2	89.1	90.8	537.9
1988	203.7	77.1	209.7	77.7	12.7	0.0	0.0	0.2	11.8	20.4	4.8	125.1	743.2
1989	170.7	81.8	143.1	55.2	4.0	1.1	0.9	22.3	22.4	17.2	40.2	92.5	651.3
1990	183.8	79.1	109.3	40.2	6.9	22.0	0.0	0.7	8.1	72.3	72.4	122.7	717.4
1991	160.2	81.3	153.5	29.3	13.1	17.9	0.0	0.1	2.2	32.7	33.0	97.5	620.9
1992	104.1	68.4	52.9	15.0	0.0	1.6	0.1	33.9	0.3	31.0	63.5	98.2	469.0
1993	175.4	57.8	151.8	49.3	0.0	4.8	0.0	25.8	16.1	67.7	119.1	137.7	805.6
1994	205.2	143.7	150.6	54.7	0.1	0.0	0.0	1.6	5.2	15.9	73.0	143.6	793.7
1995	127.7	114.2	145.3	17.1	1.2	0.0	0.1	0.2	2.5	13.9	54.1	112.0	588.4
1996	179.8	129.0	120.7	49.1	1.6	0.0	0.9	5.9	8.1	12.7	53.9	154.6	716.4
1997	197.3	157.9	214.5	52.6	3.1	0.0	0.0	16.4	34.4	23.1	93.4	127.3	920.2
1998	163.0	142.2	120.0	23.6	0.0	1.2	0.0	2.3	6.4	50.4	84.7	76.5	670.0
1999	153.7	148.7	183.7	94.4	5.9	0.0	0.0	1.1	25.5	48.4	22.5	112.6	796.4
2000	197.9	160.0	124.9	13.6	9.9	3.8	3.8	8.3	7.9	78.7	16.1	135.8	760.8
2001	245.8	112.5	159.9	30.1	16.7	0.3	3.6	3.1	12.6	6.4	4.7	75.6	671.2
2002	149.6	150.1	131.2	60.9	21.3	1.0	10.5	8.4	23.1	69.7	89.2	131.9	846.9
2003	154.9	113.6	183.3	26.1	4.4	2.2	0.0	9.8	22.2	14.6	27.8	117.5	676.4
2004	219.0	99.9	105.9	36.2	1.7	1.9	2.5	17.5	36.9	11.9	55.0	162.5	750.9
2005	86.6	200.2	119.3	36.9	0.0	0.0	0.0	3.8	0.2	56.4	72.1	108.0	683.5
2006	220.0	106.2	153.9	22.4	0.0	2.6	0.0	5.6	8.3	29.3	81.2	184.3	813.9
2007	114.1	91.5	245.7	64.0	3.9	0.0	3.0	0.1	29.8	17.7	59.9	109.5	739.3
2008	194.5	95.8	72.7	1.9	2.6	0.7	0.0	2.0	0.4	33.9	28.2	234.8	667.4
2009	99.1	114.8	134.4	43.7	0.5	0.0	0.2	0.2	16.1	20.0	100.2	153.4	682.5
2010	200.6	129.8	103.0	53.6	7.1	0.0	0.0	0.3	0.3	15.5	53.0	139.1	702.4
2011	123.3	176.0	157.6	78.2	7.9	1.2	7.3	6.4	28.0	18.3	51.3	209.3	864.8
2012	187.5	150.9	150.2	88.7	0.0	0.0	0.0	0.1	8.9	18.7	61.5	210.9	877.4
2013	152.1	135.5	98.8	10.2	3.4	15.6	4.3	7.8	1.6	40.9	51.7	190.4	712.4
2014	139.2	114.6	90.6	30.5	1.1	0.0	1.7	18.4	61.9	73.9	41.1	120.1	693.1
2015	190.0	79.3	109.6	75.5	1.2	0.1	4.3	4.8	29.2	26.6	45.6	161.3	727.4
2016	81.8	151.3	84.7	68.8	0.4	0.1	5.2	11.7	8.6	40.1	39.7	91.1	583.4
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	163.1	119.3	137.6	47.6	4.7	2.7	1.6	6.9	16.5	34.8	63.0	136.5	734.2
DESV.STD	44.0	37.4	42.8	25.5	5.3	5.5	2.6	8.3	14.9	26.2	39.5	42.3	139.6
MIN	57.3	57.8	52.9	1.9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	2.4	4.7	67.6	370.0
MAX	245.8	200.2	245.7	105.3	21.3	22.0	10.5	33.9	61.9	122.2	205.8	234.8	1188.1
MEDIANA	165.1	114.7	138.8	46.4	2.8	0.4	0.0	3.4	10.3	24.9	54.5	129.6	722.4

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A8								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°42'39.4"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	14°56'9.1"								Provincia	:	MELGAR	
Altitud (msnm)	:	4151								Distrito	:	MACARI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	160.0	129.7	117.2	71.4	6.0	1.4	0.0	24.1	17.8	53.6	64.3	135.3	780.8
1982	132.0	56.2	112.2	61.4	0.6	0.9	0.0	1.9	37.4	95.3	171.2	50.2	719.5
1983	43.0	44.5	41.6	45.3	3.9	0.9	0.1	0.6	6.2	19.2	21.0	82.7	309.1
1984	198.7	163.3	133.1	25.7	16.4	0.8	1.1	3.4	0.8	184.9	278.3	209.7	1216.1
1985	116.8	144.8	110.9	124.2	25.7	22.6	0.0	1.6	26.6	21.7	151.9	177.8	924.6
1986	124.9	138.1	147.7	94.4	14.4	0.2	0.8	6.4	25.8	3.6	44.0	174.9	775.3
1987	132.4	49.6	55.3	30.2	3.1	3.0	11.6	2.5	2.5	12.8	107.8	82.6	493.4
1988	163.5	72.4	134.7	81.4	25.2	0.0	0.0	0.5	9.8	31.4	4.7	105.1	628.6
1989	149.2	73.2	106.0	55.4	6.7	1.9	1.0	27.0	15.8	21.6	43.2	78.6	579.8
1990	131.4	75.0	63.6	44.3	12.1	30.6	0.0	2.2	6.6	100.9	86.3	92.5	645.6
1991	141.2	73.2	115.1	29.3	22.9	23.3	0.2	1.1	3.2	40.2	38.5	89.5	577.8
1992	100.9	67.3	32.8	20.8	0.4	2.5	0.2	46.1	0.3	42.0	65.8	102.7	482.0
1993	157.0	50.2	102.7	51.9	1.1	6.3	0.1	28.3	15.3	93.8	132.9	116.6	756.1
1994	152.2	103.8	111.9	58.1	2.3	0.2	0.1	2.8	4.1	21.6	80.2	132.3	669.6
1995	111.9	96.0	98.0	19.2	2.7	0.2	0.0	0.7	3.1	21.9	58.5	114.5	526.8
1996	168.8	112.3	71.5	40.0	5.1	0.1	0.5	7.5	6.5	20.6	61.1	144.6	638.7
1997	154.7	149.8	157.7	33.6	5.2	0.2	0.0	19.5	26.2	34.9	110.0	123.4	815.1
1998	140.1	114.7	91.6	27.3	0.4	1.8	0.0	2.8	2.8	65.8	94.8	66.8	608.7
1999	103.2	128.7	133.4	96.8	10.9	0.3	0.1	1.8	19.2	64.6	25.8	95.4	680.3
2000	165.0	157.1	103.3	12.5	17.3	4.2	3.5	11.5	4.9	106.9	17.2	115.9	719.4
2001	211.4	103.5	111.8	35.5	29.3	1.1	3.1	5.4	9.7	12.4	7.2	83.3	613.7
2002	126.3	140.9	86.4	58.9	34.5	2.0	12.1	12.7	17.0	94.4	98.2	126.7	810.0
2003	139.0	100.1	136.5	28.0	9.3	3.5	0.0	11.5	17.6	20.8	31.2	123.9	621.4
2004	188.3	97.7	81.2	39.2	3.9	1.9	3.5	21.7	31.6	18.1	61.4	160.9	709.5
2005	73.2	184.2	90.9	36.7	0.6	0.2	0.0	5.3	0.8	76.8	79.7	104.1	652.4
2006	178.3	84.4	120.4	26.2	0.7	2.6	0.0	5.9	5.9	46.2	92.3	159.0	721.9
2007	93.6	80.6	189.4	70.9	8.9	0.3	2.4	0.6	22.6	22.8	69.1	107.5	668.7
2008	169.2	94.6	54.7	2.5	5.0	1.0	0.0	2.3	0.5	43.6	33.8	216.5	623.8
2009	80.4	106.7	96.7	43.6	2.8	0.2	0.5	0.6	14.7	28.0	111.2	152.3	637.7
2010	162.7	122.1	72.7	56.4	15.8	0.2	0.1	0.7	0.1	23.8	54.5	126.1	635.3
2011	94.2	160.7	118.9	75.9	13.8	1.5	7.4	6.7	18.2	24.6	68.2	189.5	779.7
2012	155.2	134.8	125.7	88.3	1.9	0.2	0.1	0.7	5.0	25.0	67.1	203.2	807.2
2013	127.1	122.6	76.8	11.0	7.3	16.4	3.9	10.2	1.2	61.3	55.2	177.7	670.8
2014	115.8	100.4	73.3	29.4	2.9	0.1	2.5	20.1	43.7	97.0	48.0	114.2	647.4
2015	166.4	70.7	77.8	74.0	4.0	0.5	5.3	5.5	23.4	33.1	52.7	140.9	654.2
2016	70.9	131.7	53.7	74.4	2.0	0.5	5.0	12.0	5.7	56.3	52.4	84.7	549.4
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	136.1	106.5	100.2	49.3	9.0	3.7	1.8	8.7	12.6	48.4	73.3	126.7	676.4
DESV.STD	37.0	35.3	33.5	27.1	8.9	7.2	3.1	10.2	11.2	37.1	51.0	41.2	143.3
MIN	43.0	44.5	32.8	2.5	0.4	0.0	0.0	0.5	0.1	3.6	4.7	50.2	309.1
MAX	211.4	184.2	189.4	124.2	34.5	30.6	12.1	46.1	43.7	184.9	278.3	216.5	1216.1
MEDIANA	139.6	103.6	103.0	44.0	5.2	1.0	0.2	5.3	8.1	34.0	62.9	120.0	653.3

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A9								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°55'18.6"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	15°4'27.9"								Provincia	:	LAMPA	
Altitud (msnm)	:	4406								Distrito	:	OCUVIRI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	232.4	236.7	180.0	116.8	4.5	0.1	0.3	18.8	19.6	37.5	41.0	169.6	1057.3
1982	184.1	103.5	207.9	103.6	0.6	0.1	0.5	1.0	54.0	73.0	113.8	43.8	886.0
1983	83.0	70.8	56.6	56.0	5.1	0.2	0.6	0.2	9.3	12.2	7.8	81.4	383.2
1984	254.9	293.1	277.6	42.5	13.0	0.2	3.5	2.6	1.6	120.2	168.1	224.3	1401.5
1985	109.9	256.4	182.8	190.8	24.7	12.1	0.4	1.1	26.2	12.1	99.6	227.6	1143.6
1986	169.8	253.6	284.7	142.6	9.4	0.0	2.5	4.9	31.0	2.4	25.8	227.0	1153.6
1987	204.6	76.9	94.3	41.4	2.7	1.4	17.2	1.2	4.4	12.7	64.9	79.3	601.2
1988	253.8	126.9	244.2	149.7	21.4	0.0	0.6	0.1	10.7	22.2	3.0	120.6	953.1
1989	201.9	142.9	203.7	80.6	7.1	0.7	2.1	10.0	8.1	11.2	30.1	67.9	766.3
1990	197.2	110.0	114.0	55.3	13.5	12.8	0.5	1.3	7.2	79.2	71.1	124.6	786.8
1991	159.3	137.8	191.7	58.3	14.5	10.0	0.8	0.1	5.0	34.7	32.0	99.9	744.1
1992	104.2	136.4	54.3	24.5	0.4	1.2	1.5	23.3	0.8	29.6	41.8	114.5	532.6
1993	226.2	87.1	193.3	88.7	1.5	1.5	0.6	16.8	15.5	56.9	88.3	182.8	959.2
1994	237.5	209.1	186.6	100.6	2.1	0.0	0.6	0.3	5.0	8.9	54.9	137.3	942.8
1995	148.5	171.5	175.3	36.4	3.4	0.0	0.5	0.4	7.2	19.0	37.2	113.1	712.5
1996	216.9	205.4	156.7	82.3	5.8	0.0	1.0	4.8	10.4	14.9	35.8	189.2	923.1
1997	200.4	202.7	185.9	73.0	7.7	0.0	0.9	13.9	38.9	19.5	72.1	142.9	957.9
1998	242.9	194.7	124.5	38.8	0.3	0.5	0.4	1.3	4.4	42.5	60.1	97.9	808.3
1999	180.3	241.6	249.9	155.0	8.1	0.0	0.4	1.0	30.0	58.4	16.2	123.5	1064.3
2000	269.6	222.6	185.3	26.6	18.5	2.4	4.3	7.0	9.0	75.2	13.4	133.3	967.3
2001	295.2	159.7	234.3	69.3	27.0	0.1	5.4	2.1	11.8	4.4	2.8	80.0	892.4
2002	152.2	225.5	184.1	82.4	26.4	0.7	18.9	5.5	19.5	67.4	68.2	139.6	990.2
2003	172.4	171.0	227.1	34.9	8.1	1.3	0.5	6.5	25.1	13.9	21.5	145.9	828.4
2004	238.0	147.7	135.1	64.4	3.4	1.1	6.8	13.3	33.5	10.8	36.6	157.3	847.7
2005	105.4	274.5	148.2	68.4	0.7	0.0	0.4	2.0	1.8	35.5	54.1	132.5	823.6
2006	259.5	171.4	253.8	43.2	1.3	1.5	0.4	4.9	12.9	28.6	67.9	165.2	1010.6
2007	144.3	152.9	335.0	94.0	6.5	0.0	6.7	0.1	32.6	19.2	42.5	129.5	963.3
2008	253.3	154.4	132.6	3.7	4.6	0.4	0.5	1.4	0.8	33.0	17.6	233.5	835.8
2009	105.7	207.5	161.2	90.8	2.5	0.0	2.2	0.2	18.9	21.4	90.9	155.8	857.2
2010	225.8	218.6	136.5	83.1	9.9	0.0	0.8	0.4	1.1	20.4	41.4	176.7	914.8
2011	152.4	271.2	212.4	141.9	11.9	0.0	11.0	5.6	26.2	13.7	42.6	244.1	1132.9
2012	244.2	233.9	196.3	152.1	1.7	0.0	0.6	0.2	8.3	24.2	39.9	242.0	1143.3
2013	168.7	193.0	169.4	10.2	7.2	10.9	6.9	6.5	1.5	37.6	45.9	184.1	841.9
2014	157.6	132.0	138.5	56.2	3.3	0.0	4.2	6.5	62.0	65.9	22.7	106.9	755.7
2015	216.8	135.9	139.5	122.9	3.6	0.0	9.0	4.5	26.7	24.9	37.2	135.1	855.9
2016	73.1	231.1	94.0	84.2	2.5	0.3	9.2	6.3	5.2	35.0	27.2	100.2	668.3
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	190.1	182.2	179.1	79.6	7.9	1.6	3.4	4.9	16.3	33.3	48.2	145.2	891.8
DESV.STD	56.3	57.6	60.5	44.0	7.4	3.5	4.6	5.7	14.8	25.6	33.2	51.3	187.7
MIN	73.1	70.8	54.3	3.7	0.3	0.0	0.3	0.1	0.8	2.4	2.8	43.8	383.2
MAX	295.2	293.1	335.0	190.8	27.0	12.8	18.9	23.3	62.0	120.2	168.1	244.1	1401.5
MEDIANA	198.8	182.3	183.4	76.8	5.4	0.2	0.9	2.3	10.5	24.5	41.2	136.2	889.2

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)														
REGISTRO HISTÓRICO														
Estación	:	A10												
Longitud Oeste	:	70°46'21.3"												
Latitud Sur	:	15°4'23.7"												
Altitud (msnm)	:	4903												
Tipo	:	Est. Virtual												
Región	:	PUNO												
Provincia	:	LAMPA												
Distrito	:	OCUVIRI												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
1981	150.8	148.7	174.5	95.8	7.3	0.6	0.3	24.4	17.8	50.5	78.8	115.6	864.9	
1982	125.8	69.3	163.2	76.1	1.7	0.4	0.4	2.5	39.2	92.3	206.6	28.5	805.9	
1983	46.0	44.5	42.2	43.1	7.6	0.8	0.5	0.6	6.1	15.4	20.1	56.6	283.5	
1984	183.8	191.0	196.3	33.6	24.4	0.5	2.6	4.5	0.7	171.1	324.2	172.9	1305.4	
1985	106.1	174.5	166.7	166.6	42.7	15.9	0.4	1.5	19.3	18.6	192.0	149.6	1054.0	
1986	113.8	169.1	227.1	119.7	19.5	0.0	1.5	6.1	22.4	3.2	44.5	138.9	865.8	
1987	128.9	47.8	82.0	35.3	4.8	2.7	20.5	2.5	2.5	14.8	135.2	58.3	535.3	
1988	152.6	82.9	186.4	114.7	37.7	0.0	0.5	0.4	8.3	31.1	5.5	80.0	700.2	
1989	136.7	85.6	160.5	69.5	10.5	1.4	2.2	18.9	9.4	17.1	54.8	60.3	626.9	
1990	124.8	82.2	89.2	49.7	21.0	19.7	0.4	2.5	5.7	94.1	114.8	76.8	680.8	
1991	129.6	91.0	174.4	38.7	32.3	12.1	1.0	1.1	4.5	38.6	50.3	68.4	641.9	
1992	92.5	81.2	41.9	25.5	1.2	1.7	1.0	37.8	0.3	41.0	68.4	91.9	484.4	
1993	148.4	56.2	149.2	74.7	3.3	2.7	0.5	22.2	14.3	82.3	149.8	108.3	812.0	
1994	152.0	126.8	163.5	75.8	6.1	0.0	0.8	1.9	4.2	17.9	99.7	101.2	749.8	
1995	106.4	107.9	138.8	25.2	6.2	0.0	0.4	0.9	4.8	22.8	72.8	86.4	572.6	
1996	163.8	129.2	101.0	53.8	11.2	0.0	1.0	6.7	6.8	20.4	71.7	123.4	689.0	
1997	138.1	162.9	205.3	38.4	9.7	0.0	0.6	17.5	24.3	32.5	131.6	97.9	858.8	
1998	148.7	126.8	127.2	40.5	1.1	0.8	0.4	2.2	2.1	56.2	114.6	53.9	674.3	
1999	93.3	141.7	214.8	123.4	17.0	0.0	0.6	1.7	20.8	71.7	30.2	77.9	792.9	
2000	164.8	171.0	166.0	18.6	26.0	2.6	3.7	10.9	5.2	95.7	21.4	94.4	780.2	
2001	209.4	120.6	175.4	50.5	43.2	0.5	4.8	4.9	9.3	12.3	10.5	66.4	707.9	
2002	115.6	165.4	131.5	73.0	44.5	1.2	16.4	10.3	14.6	84.1	115.2	108.3	880.0	
2003	132.3	117.9	203.1	34.7	15.3	2.1	0.5	8.7	16.8	18.8	36.9	105.8	693.0	
2004	175.4	116.0	118.4	52.1	6.9	1.0	6.2	18.5	26.4	16.0	72.5	118.2	727.5	
2005	74.6	198.5	133.5	50.0	1.6	0.0	0.4	4.1	1.7	57.4	93.6	92.6	708.1	
2006	170.6	95.4	191.4	40.1	2.2	1.2	0.5	5.5	7.3	42.9	114.2	116.0	787.3	
2007	91.6	96.1	295.9	87.1	14.8	0.0	4.1	0.8	22.6	23.5	84.0	88.9	809.4	
2008	173.2	104.8	95.8	4.2	8.1	0.5	0.4	2.0	0.8	40.9	39.0	166.8	636.6	
2009	75.0	132.5	136.3	53.1	6.5	0.0	1.7	0.7	14.1	26.0	139.2	120.7	705.8	
2010	151.1	147.8	110.5	63.8	22.3	0.0	0.6	0.9	0.2	24.3	65.9	112.6	700.2	
2011	92.7	188.8	181.1	94.7	18.1	0.4	9.9	5.4	17.1	22.0	84.3	149.9	864.3	
2012	160.4	160.3	195.5	116.9	4.4	0.0	0.7	1.0	4.8	24.9	77.2	169.6	915.7	
2013	113.5	132.9	129.7	12.8	13.0	9.3	5.2	9.1	1.2	55.9	72.2	140.7	695.3	
2014	109.2	102.5	119.3	40.9	5.9	0.0	4.3	13.5	38.2	78.2	49.5	83.0	644.4	
2015	155.5	81.9	106.9	88.8	8.0	0.2	7.9	5.2	20.9	29.7	66.3	99.8	671.1	
2016	64.7	146.6	76.1	82.2	4.4	0.4	7.5	9.2	4.1	45.7	60.6	69.3	570.6	
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
MEDIA	129.8	122.2	149.2	62.9	14.2	2.2	3.1	7.4	11.6	44.2	88.0	101.4	736.0	
DESV.STD	36.0	40.7	52.2	35.2	12.4	4.5	4.5	8.3	10.2	33.6	60.9	34.4	165.9	
MIN	46.0	44.5	41.9	4.2	1.1	0.0	0.3	0.4	0.2	3.2	5.5	28.5	283.5	
MAX	209.4	198.5	295.9	166.6	44.5	19.7	20.5	37.8	39.2	171.1	324.2	172.9	1305.4	
MEDIANA	131.0	123.7	154.9	52.6	8.9	0.5	0.9	4.7	7.8	31.8	72.6	98.8	706.8	

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A11								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°55'28.8"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	15°12'33.3"								Provincia	:	LAMPA	
Altitud (msnm)	:	4621								Distrito	:	OCUVIRI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	280.4	168.3	195.4	98.3	1.9	0.0	0.9	21.5	17.4	27.5	44.6	180.4	1036.6
1982	267.2	96.2	208.6	72.7	0.5	0.0	0.8	2.4	62.1	68.1	131.9	25.6	936.1
1983	104.0	47.8	28.4	21.2	4.7	0.5	0.9	0.3	9.2	7.0	5.9	72.9	302.8
1984	304.4	251.9	267.3	34.3	9.4	0.4	4.3	5.9	1.6	97.8	172.1	253.3	1402.8
1985	116.0	233.9	202.5	161.5	23.8	10.0	0.8	0.9	21.6	7.9	111.1	213.0	1103.1
1986	205.2	262.6	332.3	128.1	7.8	0.0	2.4	5.8	22.3	2.4	23.2	251.6	1243.7
1987	239.4	58.4	103.4	26.3	1.7	2.0	30.2	1.4	4.2	18.4	78.9	72.5	636.9
1988	307.3	109.7	274.2	134.0	11.8	0.0	1.0	0.0	9.1	18.5	2.4	110.6	978.6
1989	207.3	126.4	235.2	51.5	5.9	0.7	3.2	6.6	4.3	7.6	35.9	59.1	743.5
1990	239.6	85.3	108.0	39.7	12.1	7.3	0.8	3.2	6.0	64.9	90.9	110.8	768.5
1991	185.5	138.6	163.9	41.8	10.0	5.7	1.6	0.0	8.0	26.9	41.1	112.3	735.2
1992	135.6	99.1	42.9	24.3	0.3	1.1	2.0	17.7	0.8	27.0	46.4	136.2	533.4
1993	277.2	73.6	232.4	75.7	2.6	0.6	0.9	12.0	14.0	46.2	95.6	241.0	1071.9
1994	362.4	198.7	210.7	77.8	4.9	0.0	1.3	0.2	4.8	6.1	57.6	142.8	1067.4
1995	154.2	133.7	179.6	39.4	4.1	0.0	1.0	1.0	16.5	16.0	44.6	128.1	718.2
1996	294.5	155.7	139.4	64.4	8.9	0.0	1.7	6.6	9.8	11.0	47.3	208.9	948.3
1997	236.6	220.5	150.8	39.4	9.7	0.0	1.4	13.4	39.1	14.4	85.6	134.5	945.5
1998	296.4	176.5	117.8	24.5	0.2	0.4	0.7	1.0	2.8	30.8	73.4	114.0	838.4
1999	203.9	217.9	345.4	107.2	7.0	0.0	0.9	0.9	27.6	63.0	15.9	154.7	1144.4
2000	323.6	215.3	242.8	24.8	13.8	1.3	2.6	5.0	9.1	64.5	14.5	165.6	1082.9
2001	375.0	201.0	268.7	66.4	18.9	0.2	5.4	4.2	11.1	11.2	12.6	86.6	1061.4
2002	163.2	224.6	209.9	72.6	16.7	0.6	19.9	3.9	14.5	51.2	78.9	179.3	1035.2
2003	204.4	173.1	270.5	34.7	8.1	0.7	1.1	4.6	21.6	12.1	20.7	172.3	923.7
2004	293.0	164.4	158.1	47.3	1.9	0.2	10.0	9.6	29.5	9.1	39.6	146.2	908.9
2005	148.2	234.8	150.7	54.0	0.4	0.0	0.8	1.4	8.0	23.0	59.1	173.4	853.8
2006	265.9	155.2	281.4	44.9	1.9	0.3	0.9	3.9	16.8	28.1	82.1	161.3	1042.5
2007	189.8	152.5	356.5	72.7	5.7	0.0	5.8	0.5	27.1	20.2	47.8	132.3	1011.0
2008	349.6	139.1	134.5	4.8	3.1	0.0	0.8	1.3	1.6	28.7	25.2	238.2	927.0
2009	147.8	205.9	155.4	65.4	3.2	0.0	5.4	0.6	21.5	16.8	97.9	153.0	872.9
2010	283.0	209.9	138.3	53.2	9.0	0.0	1.2	0.9	2.3	20.0	43.8	204.3	965.8
2011	214.2	250.5	219.7	85.4	7.1	0.0	9.5	3.9	19.5	13.4	50.6	246.3	1120.1
2012	328.6	237.8	238.3	96.0	3.4	0.0	1.2	0.7	14.3	26.9	40.6	261.2	1249.0
2013	199.6	175.8	216.4	9.8	8.5	4.6	5.3	6.6	1.5	32.6	55.1	207.1	923.1
2014	210.7	113.9	175.7	50.4	3.7	0.0	3.6	4.0	56.7	43.2	26.0	106.4	794.3
2015	260.1	125.2	161.8	86.3	5.2	0.0	8.9	5.1	25.5	18.3	48.8	116.0	861.1
2016	102.9	218.7	98.8	63.4	3.0	0.7	8.3	3.6	3.2	25.7	30.0	113.1	671.3
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	235.5	168.1	194.9	60.9	6.7	1.0	4.1	4.5	15.7	28.0	54.9	155.1	929.4
DESV.STD	72.8	57.9	76.0	34.7	5.4	2.2	5.9	4.9	14.2	21.2	36.1	59.1	207.5
MIN	102.9	47.8	28.4	4.8	0.2	0.0	0.7	0.0	0.8	2.4	2.4	25.6	302.8
MAX	375.0	262.6	356.5	161.5	23.8	10.0	30.2	21.5	62.1	97.8	172.1	261.2	1402.8
MEDIANA	238.0	170.7	198.9	53.6	5.4	0.1	1.5	3.7	12.6	21.6	46.9	149.6	940.8

Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1



PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A12								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°47'22.0"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	15°12'14.1"								Provincia	:	LAMPA	
Altitud (msnm)	:	4971								Distrito	:	OCUVIRI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	199.2	183.4	202.3	109.3	1.5	0.3	0.6	25.6	18.9	43.6	54.7	131.8	971.1
1982	179.9	92.3	162.6	73.1	0.6	0.4	0.5	5.0	49.9	84.5	145.4	14.6	808.6
1983	65.0	40.1	12.6	12.7	4.7	1.9	0.7	0.5	4.7	10.1	8.2	40.2	201.5
1984	200.5	223.2	182.4	42.5	11.1	0.8	2.8	8.1	0.6	131.4	167.9	191.8	1163.0
1985	109.2	237.8	155.4	199.4	25.5	14.5	0.5	0.8	10.7	14.7	127.0	175.1	1070.7
1986	127.3	255.4	266.9	131.8	8.9	0.0	1.0	5.4	16.1	2.9	25.4	169.7	1010.9
1987	153.7	44.8	98.4	31.4	1.4	4.9	28.0	1.8	2.9	24.6	88.2	61.6	541.6
1988	193.1	104.4	251.7	148.3	9.1	0.0	0.5	0.1	5.2	25.3	2.6	80.1	820.5
1989	143.1	111.1	193.3	54.8	6.0	1.9	2.3	8.2	3.9	12.0	43.6	69.4	649.5
1990	142.2	89.5	92.3	33.5	11.2	9.3	0.5	3.3	3.7	79.6	84.7	92.4	642.3
1991	136.9	123.6	149.2	44.7	13.4	6.1	1.3	0.4	9.5	35.0	41.1	82.4	643.6
1992	98.1	100.3	31.6	25.4	0.4	1.7	0.9	19.2	0.3	37.5	50.2	112.7	478.3
1993	159.0	69.8	162.4	84.7	3.3	1.1	0.6	12.6	10.4	60.1	95.6	177.5	837.0
1994	221.0	209.1	186.0	82.0	4.9	0.1	1.3	0.9	5.9	13.5	70.7	114.4	909.7
1995	114.1	118.0	130.0	30.1	5.6	0.0	0.7	1.4	12.6	21.9	57.7	94.3	586.3
1996	202.4	157.2	95.4	73.7	10.0	0.0	1.3	6.9	8.4	15.4	51.4	152.0	774.2
1997	167.0	208.2	132.4	33.4	6.9	0.0	1.5	11.4	20.9	26.8	77.1	96.5	782.1
1998	186.6	175.1	115.1	37.4	0.2	0.6	0.5	1.6	1.3	42.6	79.7	66.8	707.5
1999	121.9	170.8	263.8	110.6	8.2	0.0	0.7	1.6	18.9	83.6	16.8	95.0	891.9
2000	187.3	207.7	210.1	27.9	11.4	1.8	1.7	6.6	7.8	73.5	14.3	127.9	878.1
2001	278.7	206.7	222.8	58.8	19.0	0.6	4.0	4.9	9.4	19.6	18.4	74.0	916.8
2002	123.4	224.5	154.3	78.7	14.7	0.8	11.9	5.8	13.0	68.9	76.2	141.9	914.1
2003	151.7	166.6	247.1	37.4	7.7	1.4	0.7	4.6	16.0	17.2	20.4	132.1	802.8
2004	201.0	171.7	121.6	50.6	2.9	0.5	6.6	11.1	22.2	14.9	50.6	118.8	772.4
2005	102.1	223.1	135.6	60.5	0.4	0.0	0.5	2.3	5.9	33.1	62.6	134.2	760.3
2006	177.5	130.4	217.0	51.0	1.9	0.6	0.5	4.5	11.8	40.6	82.3	110.9	828.8
2007	117.5	138.3	316.4	81.0	7.4	0.1	4.0	1.2	21.1	27.3	59.9	103.1	877.1
2008	235.7	129.6	113.7	6.9	3.8	0.5	0.5	1.6	1.6	39.1	31.9	180.2	744.8
2009	103.5	188.3	140.2	47.2	4.2	0.0	2.9	0.9	16.0	22.9	83.9	129.3	739.2
2010	177.7	196.2	109.7	52.4	9.2	0.0	0.7	1.4	0.8	25.8	51.9	157.2	783.0
2011	126.5	248.0	200.8	68.8	7.1	0.2	7.3	3.9	15.4	21.1	59.3	170.5	928.9
2012	206.1	218.4	230.0	93.0	3.7	0.1	1.1	1.7	7.8	28.3	52.1	196.9	1039.1
2013	127.1	178.1	179.2	13.3	8.4	3.5	3.0	6.2	1.3	44.4	58.9	165.5	788.8
2014	139.6	131.2	162.9	55.5	4.0	0.0	2.8	6.0	32.9	52.3	32.2	89.3	708.8
2015	183.2	117.0	123.3	85.1	5.6	0.5	5.9	4.2	18.0	21.4	52.1	100.6	716.8
2016	84.9	199.7	93.4	65.6	3.0	0.8	5.5	5.4	2.2	33.2	39.2	83.6	616.6
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	156.8	160.8	162.8	63.7	6.9	1.5	2.9	5.2	11.3	37.5	59.3	117.6	786.3
DESV.STD	45.8	56.6	64.7	39.3	5.3	2.9	4.9	5.3	10.0	26.5	35.6	43.6	176.5
MIN	65.0	40.1	12.6	6.9	0.2	0.0	0.5	0.1	0.3	2.9	2.6	14.6	201.5
MAX	278.7	255.4	316.4	199.4	25.5	14.5	28.0	25.6	49.9	131.4	167.9	196.9	1163.0
MEDIANA	152.7	171.2	158.9	55.2	5.8	0.5	1.2	4.3	9.4	27.8	53.4	113.5	785.9

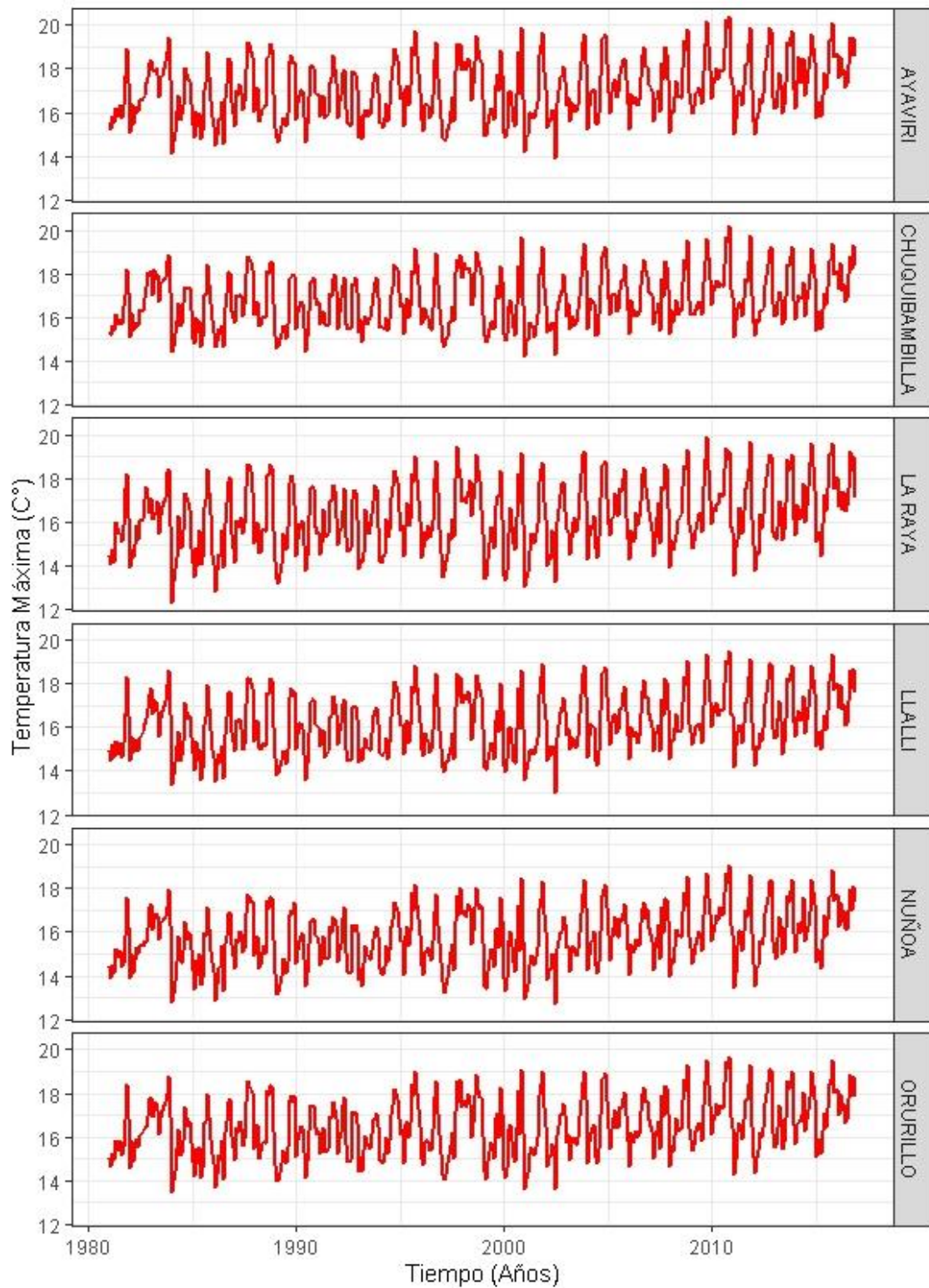
Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1

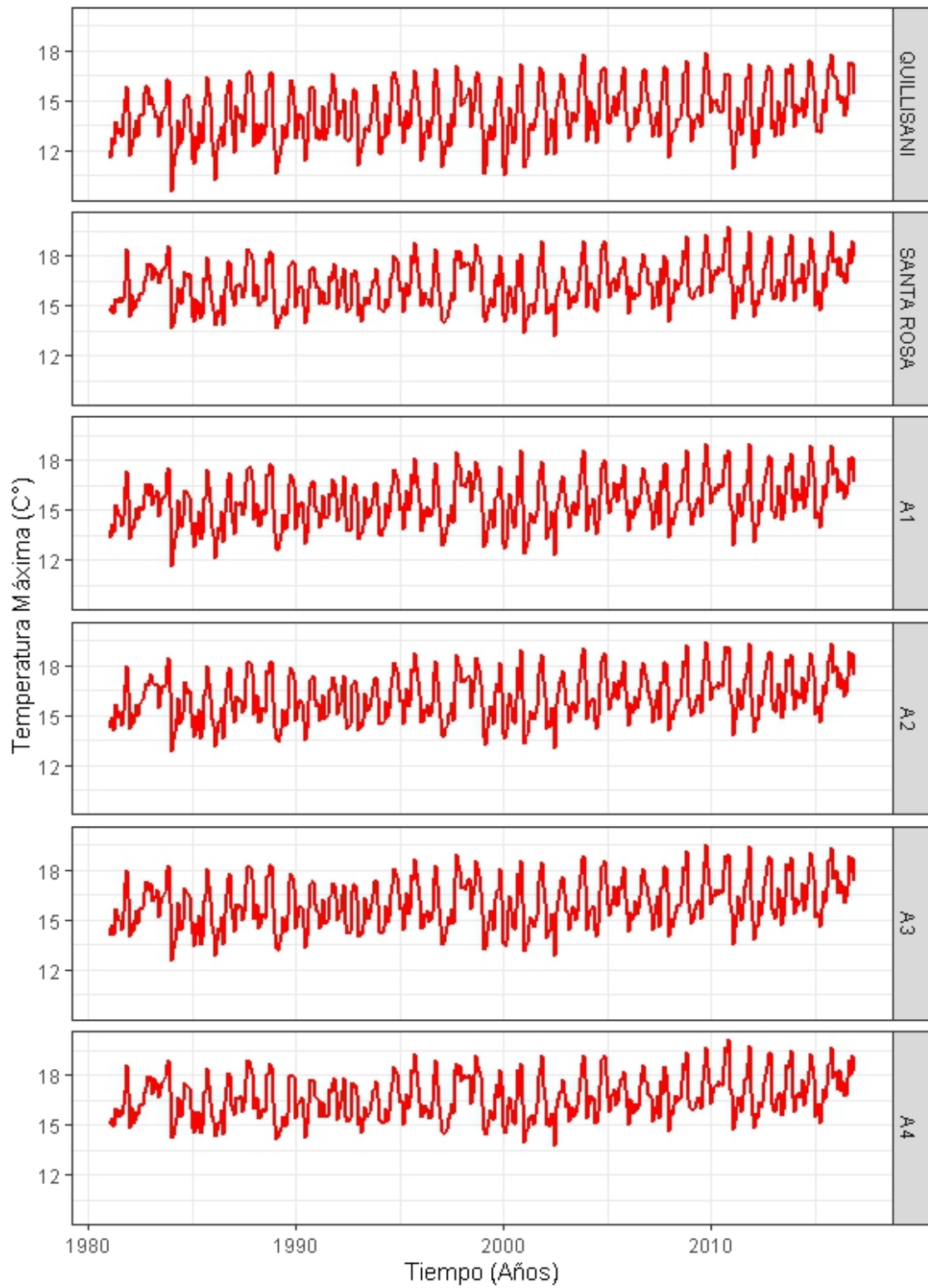


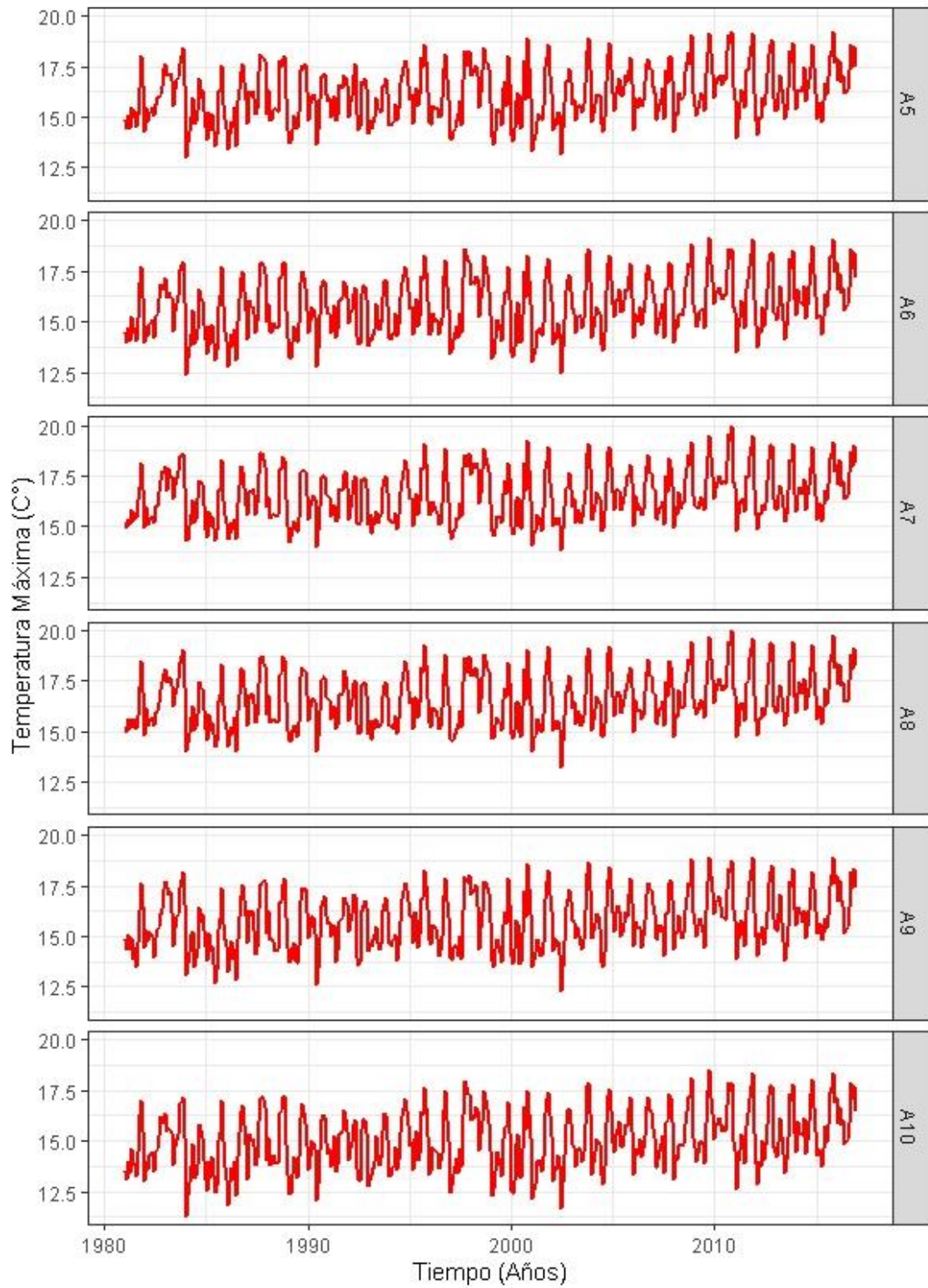
PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL (mm)													
REGISTRO HISTÓRICO													
Estación	:	A13								Tipo	:	Est. Virtual	
Longitud Oeste	:	70°52'6.5"								Región	:	PUNO	
Latitud Sur	:	15°18'50.3"								Provincia	:	LAMPA	
Altitud (msnm)	:	4761								Distrito	:	OCUVIRI	
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1981	203.5	194.8	189.0	68.0	0.7	0.0	0.2	24.9	15.8	34.2	52.0	163.5	946.8
1982	217.3	105.5	155.6	41.7	0.4	0.2	0.2	3.6	59.5	80.5	164.8	13.5	842.7
1983	65.6	37.4	8.6	6.2	4.1	1.4	0.3	0.3	5.1	6.4	6.3	51.4	193.2
1984	191.4	286.9	179.0	22.2	8.2	0.5	2.0	7.9	0.9	120.1	176.1	242.6	1237.8
1985	89.7	298.6	145.1	111.1	27.1	12.8	0.2	0.8	12.6	9.9	124.2	200.3	1032.3
1986	144.3	329.3	270.0	74.8	8.1	0.0	0.7	4.5	15.7	2.8	23.8	227.7	1101.9
1987	153.5	51.4	90.8	15.1	1.1	4.4	23.1	1.2	3.7	27.2	92.7	71.0	535.1
1988	239.0	125.3	233.4	85.2	6.5	0.0	0.3	0.0	6.2	22.1	2.6	93.3	813.9
1989	143.3	128.9	195.3	26.5	5.7	1.1	1.4	4.6	3.0	9.2	48.6	70.7	638.4
1990	153.4	99.6	98.2	19.3	10.5	5.3	0.2	3.8	3.5	68.5	103.4	118.9	684.6
1991	129.3	144.8	132.9	25.4	8.6	4.1	0.7	0.0	10.2	33.5	50.2	105.8	645.5
1992	101.0	112.3	23.1	17.6	0.2	1.0	0.6	12.4	0.4	32.9	53.4	142.7	497.6
1993	174.4	93.2	167.7	48.0	3.0	0.4	0.2	9.0	11.5	51.2	96.6	257.9	913.1
1994	259.1	265.7	174.3	50.3	5.9	0.0	0.9	0.1	5.8	9.1	70.8	141.9	983.9
1995	106.3	141.0	136.7	25.4	4.6	0.0	0.3	1.3	20.3	21.2	61.8	123.9	642.8
1996	227.0	176.0	109.5	41.5	9.5	0.0	0.8	7.2	8.7	11.9	54.0	197.8	843.9
1997	174.1	256.3	109.7	20.2	8.1	0.0	1.0	9.4	28.8	16.9	84.2	118.6	827.4
1998	235.8	227.0	95.0	18.3	0.1	0.3	0.2	1.4	1.6	33.4	81.9	107.1	801.9
1999	148.9	233.5	311.4	69.8	7.0	0.0	0.3	1.4	20.6	83.4	14.6	137.0	1027.9
2000	204.8	266.3	208.2	18.7	10.6	1.1	0.8	3.9	10.7	66.4	16.1	179.6	987.2
2001	284.6	261.2	234.2	38.2	14.7	0.4	2.3	4.2	10.8	20.4	26.4	92.1	989.4
2002	123.2	285.9	159.6	46.0	11.9	0.5	8.5	3.4	12.5	57.4	86.1	182.9	978.0
2003	146.9	219.1	249.2	24.0	7.4	0.6	0.4	3.6	17.2	13.6	18.7	166.2	866.8
2004	203.2	209.8	128.3	28.4	1.8	0.1	5.1	7.5	22.3	13.0	53.3	133.2	805.9
2005	113.7	250.9	126.1	34.8	0.3	0.0	0.2	1.2	11.0	21.6	66.7	186.8	813.5
2006	175.5	177.0	224.9	29.6	2.1	0.2	0.2	3.2	16.5	35.0	92.2	136.2	892.6
2007	133.4	194.5	300.3	45.5	5.7	0.0	2.8	1.0	23.1	26.5	60.7	126.5	920.0
2008	262.0	160.5	109.6	4.0	3.0	0.1	0.2	1.3	1.8	34.1	34.6	219.7	831.0
2009	115.1	261.1	123.8	32.0	3.6	0.0	3.1	0.8	21.0	20.2	95.4	147.6	823.6
2010	195.8	248.0	107.9	30.3	7.6	0.0	0.4	1.3	1.9	24.1	58.0	205.9	881.2
2011	150.4	302.7	197.6	40.3	6.1	0.0	4.2	3.0	16.2	18.2	63.4	231.1	1033.2
2012	234.0	277.0	222.6	54.5	4.0	0.0	0.7	1.2	15.7	31.6	50.9	237.1	1129.2
2013	140.0	216.4	182.2	7.2	8.4	2.4	1.8	4.9	1.3	37.2	64.5	201.5	867.9
2014	151.2	150.7	160.3	36.2	3.9	0.0	1.2	3.1	36.8	44.5	35.4	103.5	726.8
2015	188.4	146.7	127.4	47.2	5.5	0.2	3.9	3.8	19.5	19.0	59.5	109.8	730.9
2016	82.6	250.2	95.2	34.6	3.3	0.9	3.7	3.2	1.9	28.2	38.4	110.5	652.6
N' DATOS	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
MEDIA	168.4	199.6	160.6	37.2	6.1	1.1	2.0	4.0	13.2	32.9	63.4	148.8	837.2
DESV.STD	53.4	74.3	67.4	22.5	5.0	2.4	4.0	4.6	11.6	24.7	38.4	57.8	194.9
MIN	65.6	37.4	8.6	4.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.4	2.8	2.6	13.5	193.2
MAX	284.6	329.3	311.4	111.1	27.1	12.8	23.1	24.9	59.5	120.1	176.1	257.9	1237.8
MEDIANA	153.4	213.1	157.6	33.3	5.7	0.2	0.7	3.2	11.3	26.8	58.7	139.4	843.3

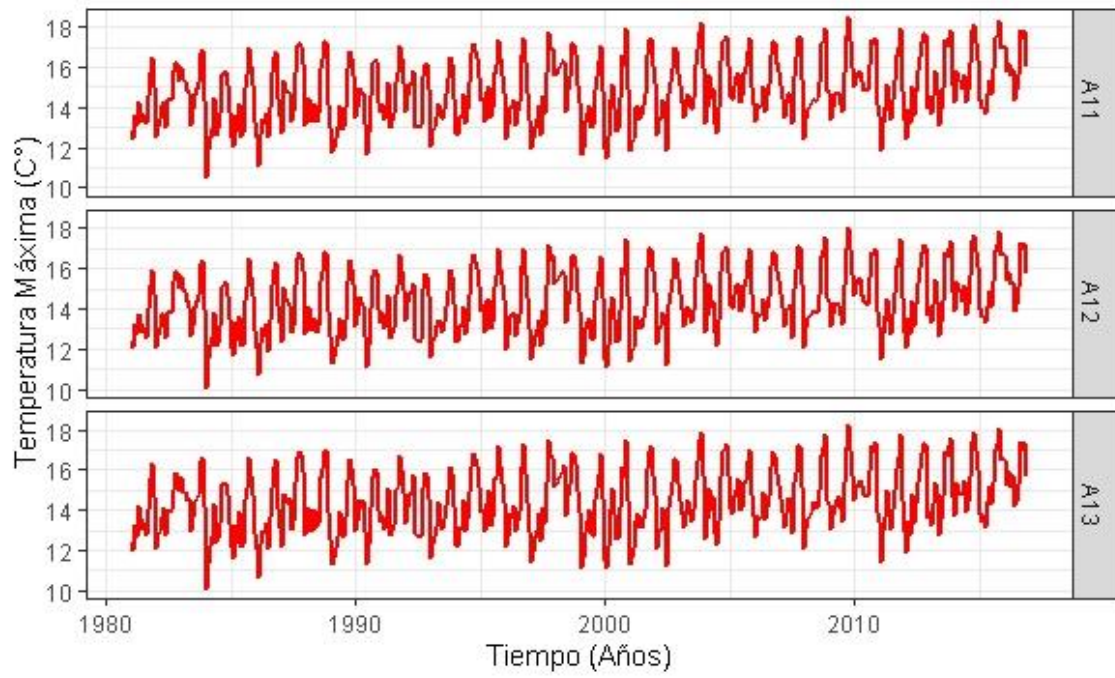
Fuente: SENAMHI-PISCOpm v.2.1

Anexo E: Temperatura máxima mensual producto PISCOt v.1.1

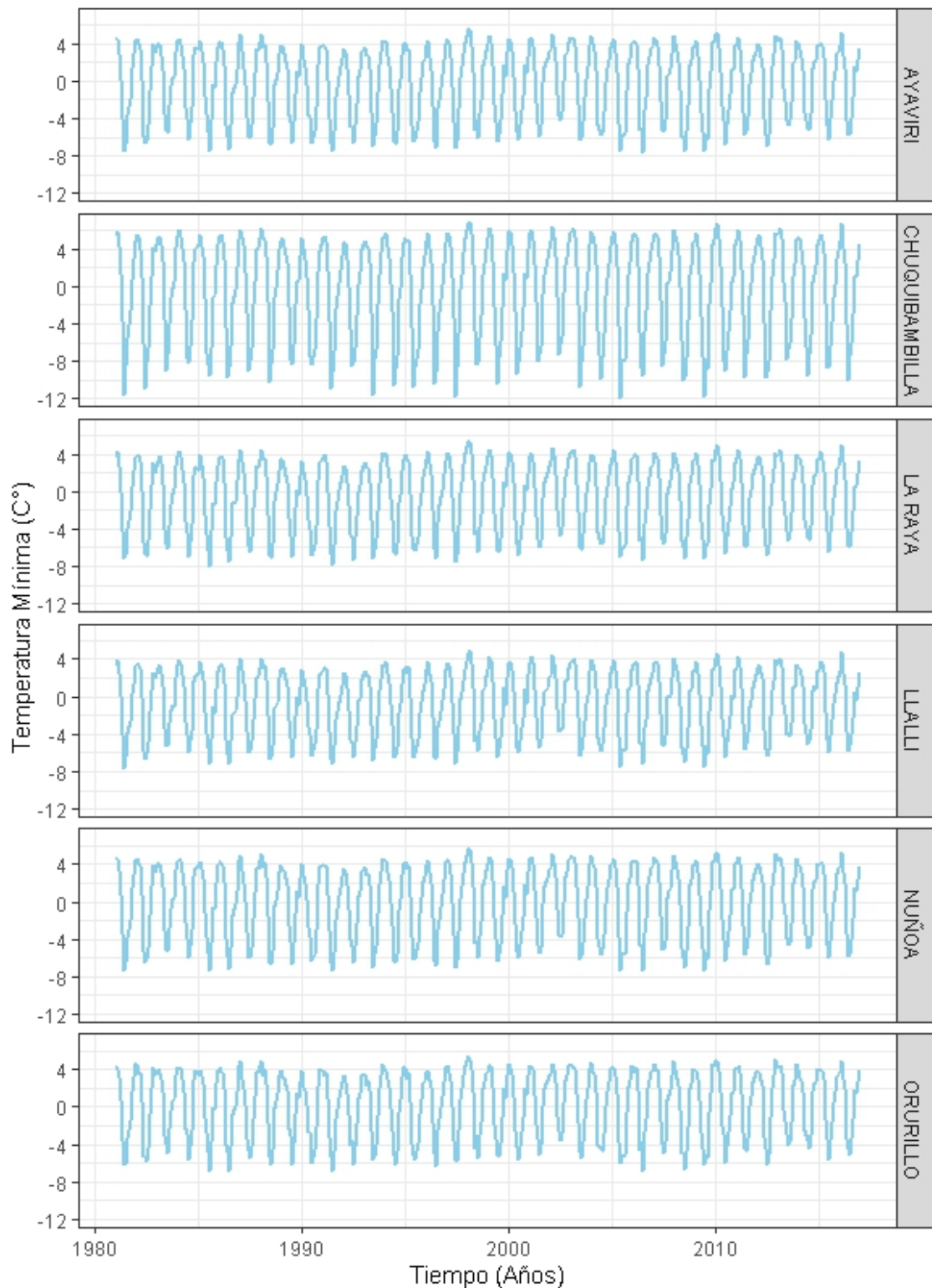


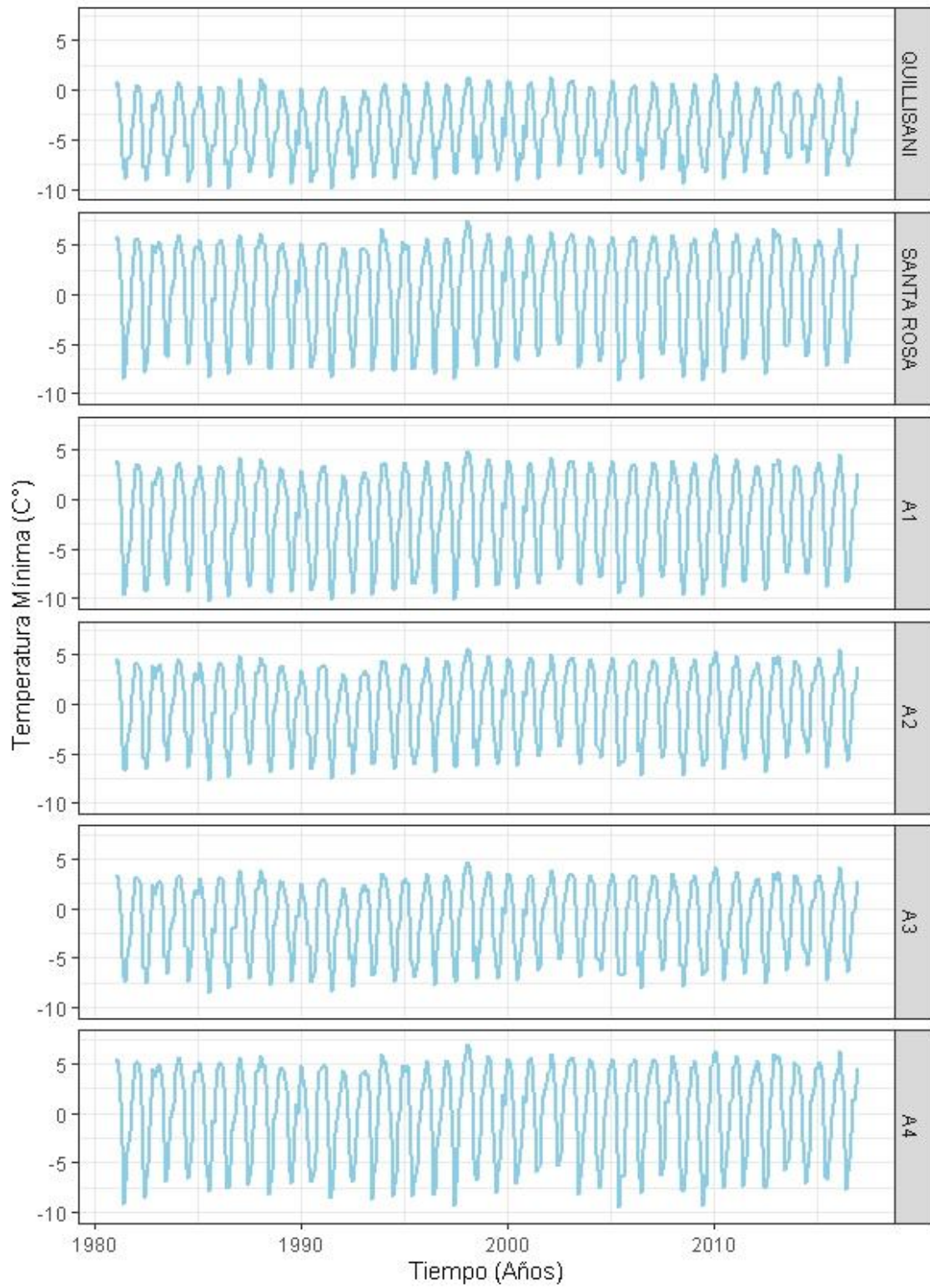


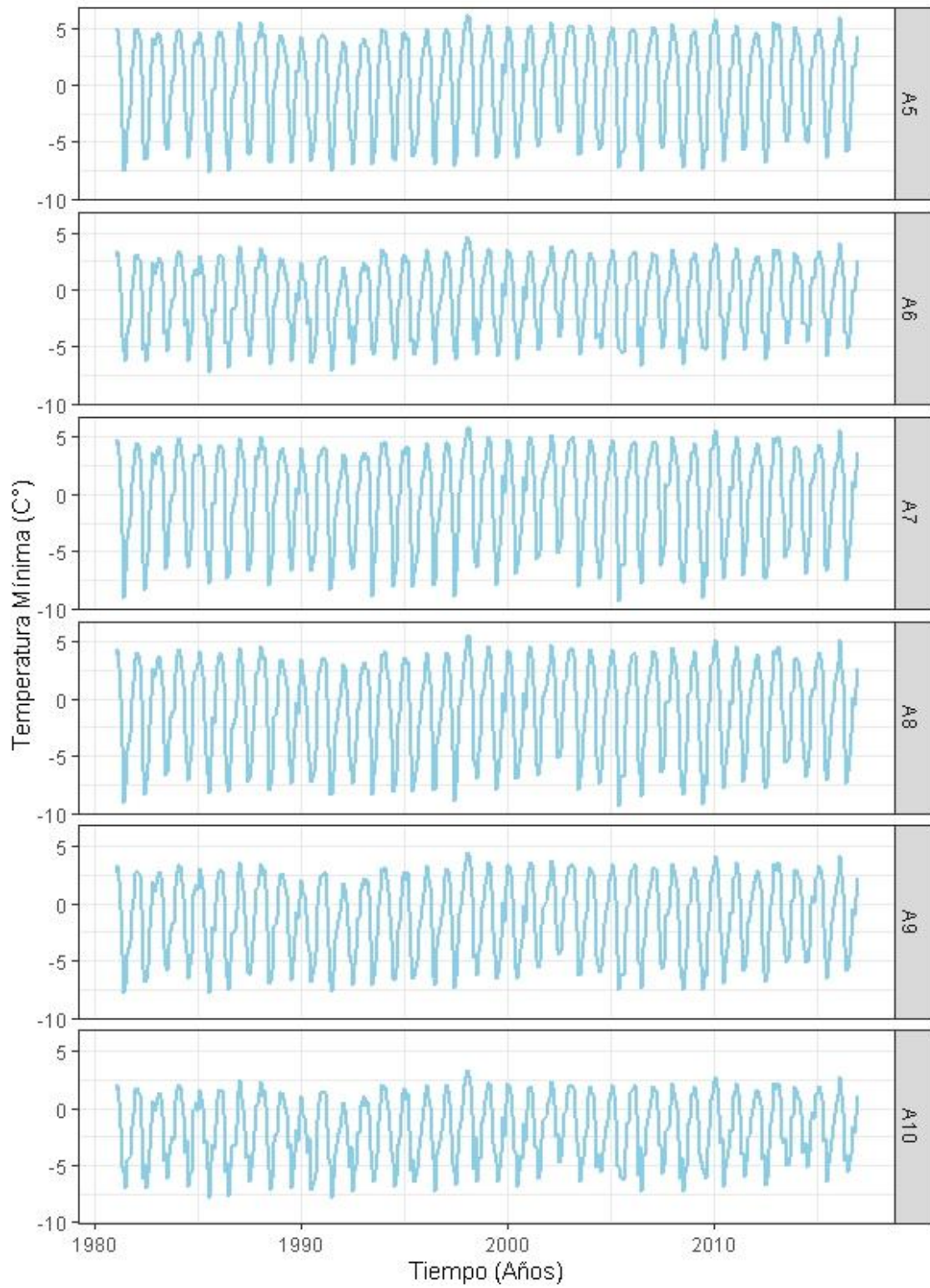


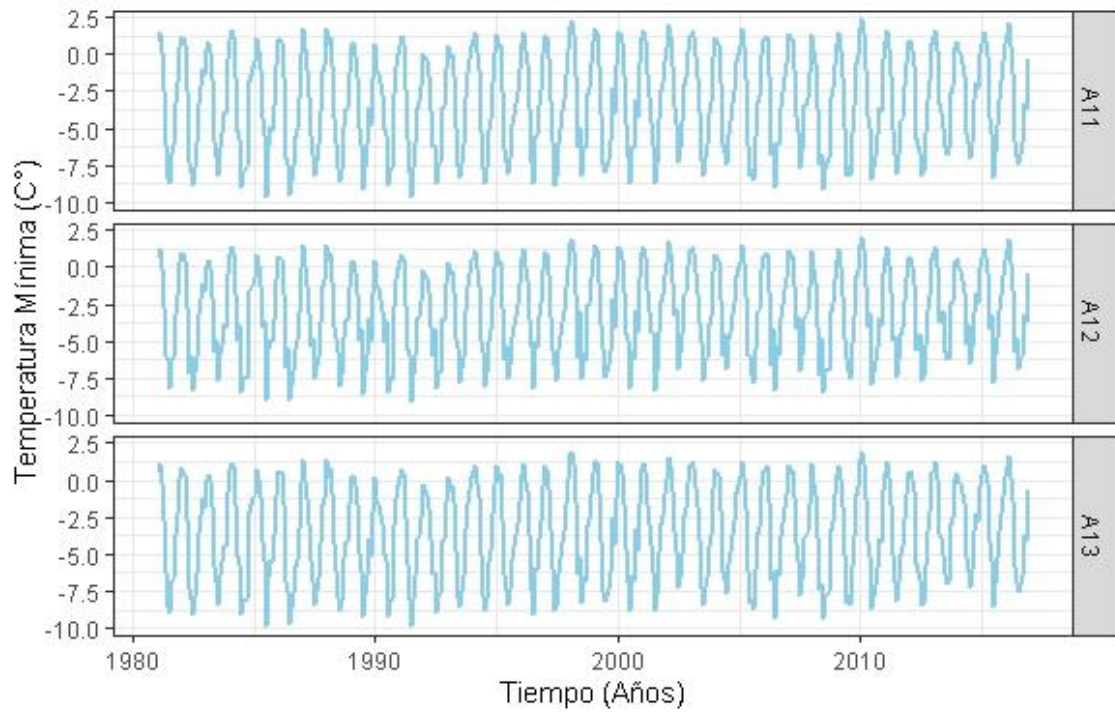


Anexo F: Temperatura mínima mensual producto PISCOt v.1.1











AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo FELIX HUAMAN ATAYUPANQUI identificado con DNI 43533235 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS LUTZ-SCHOLZE, GR2M Y ABCD PARA ESTIMAR EL CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL RÍO AYAVIRI, 1981-2016"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de MAYO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo FELIX HUAMAN ATAYUPANQUI
identificado con DNI 43533235 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" ANALISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS LUTZ-SCHOLZ,
GR2M Y ABCD PARA ESTIMAR EL CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA
UNIDAD HIDROGRAFICA DEL RIO AYAVIRI, 1981 - 2016 "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de MAYO del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella