



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



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO BAJO
ESCENARIOS DEL CMIP5 EN EL COMPORTAMIENTO DE
CAUDALES MÁXIMOS PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO
PUTINA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. CALIXTO CALATAYUD FLORES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO - PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO BAJO ESCENARIOS DEL CMI P5 EN EL COMPORTAMIENTO DE CAUDALES MÁXIMOS PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO PUTINA

AUTOR

CALIXTO CALATAYUD FLORES

RECUENTO DE PALABRAS

56541 Words

RECUENTO DE CARACTERES

256568 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

271 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

5.5MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 12, 2024 10:07 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Nov 12, 2024 10:11 AM GMT-5

● 13% de similitud general

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

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 6% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Dr. German Belizario Quispe
DOCENTE - UNA - PUNO


Dr. CALIXTO CALATAYUD FLORES
Director Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno

Resumen



DEDICATORIA

Dedico este trabajo en memoria de mis padres, Margarita y Honorato, quienes con su amor, sacrificio y sabias palabras me inspiraron a seguir adelante, aun en los momentos más difíciles. A pesar de su ausencia, su ejemplo y enseñanzas han sido una guía constante en mi vida.

A mi familia, que ha estado siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional y creyendo en mí incluso cuando yo dudaba. A mis hermanas, por su amor y por ser mi refugio en los días más complicados. Este logro es tanto mío como de ustedes.

A mis amigos y compañeros de trabajo, con quienes compartí retos y alegrías a lo largo de estos años. Su aliento, compañerismo y buenos momentos hicieron que esta etapa fuera inolvidable y más llevadera.

Dedico este logro también a los docentes de mi facultad, quienes me brindaron no solo sus conocimientos, sino también su tiempo y dedicación para formarme como profesional. Gracias a su guía, hoy puedo culminar este importante capítulo de mi vida.

Calixto Calatayud Flores



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Germán Belizario Quispe, mi asesor, por su invaluable guía y apoyo incondicional a lo largo de estos años y de este proyecto. Su conocimiento y paciencia fueron esenciales para el desarrollo exitoso de esta investigación.

Agradezco profundamente a mis compañeros de trabajo y amigos, quienes estuvieron a mi lado brindando colaboración y aliento en los momentos más desafiantes. Su amistad y sus consejos hicieron que este proceso fuera más llevadero y enriquecedor.

Quisiera dedicar un agradecimiento especial a mi familia, en particular a mis hermanas, por su comprensión y apoyo inquebrantable durante todos estos años de estudio. Su amor y motivación fueron la fuerza que me impulsó a alcanzar esta meta.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola y a los miembros del jurado, por proporcionarme los recursos y el apoyo necesarios para la realización de este trabajo.

Calixto Calatayud Flores



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	21
ABSTRACT.....	22
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
1.1.1. Problema general.....	27
1.1.2. Problemas específicos	27
1.2. HIPÓTESIS	28
1.2.1. Hipótesis general.....	28
1.2.2. Hipótesis específicas	28
1.3. JUSTIFICACIÓN	28
1.4. OBJETIVOS.....	30
1.4.1. Objetivo general	30
1.4.2. Objetivos específicos	30



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	32
2.1.1.	Internacionales	32
2.1.2.	Nacionales	33
2.1.3.	Regionales	34
2.2.	MARCO TEÓRICO	36
2.2.1.	Análisis hidrológico	36
2.2.1.1.	Cuenca hidrográfica	36
2.2.1.2.	Morfología de la cuenca.....	36
2.2.1.3.	Máximas avenidas.....	40
2.2.1.4.	Precipitación.....	40
2.2.1.5.	Precipitación máxima probable.....	40
2.2.1.6.	Periodo de retorno	41
2.2.1.7.	Análisis de Frecuencias de precipitaciones.....	42
2.2.1.8.	Funciones de distribución de Probabilidad	43
2.2.1.9.	Pruebas de bondad de ajuste	43
2.2.1.10.	Tormentas de diseño/precipitación de diseño	47
2.2.1.11.	Relaciones Intensidad – Duración - Frecuencia.....	47
2.2.1.12.	Hietograma de precipitación	49
2.2.1.13.	Relación Lluvia - Esguerrimiento	50
2.2.2.	Cambio climático global y modelos climáticos CMIP5	53
2.2.2.1.	Cambio climático	53
2.2.2.2.	Modelos climáticos globales.....	55
2.2.2.3.	CMIP5	57



2.2.2.4. Escenarios de cambio climático.....	58
2.2.2.5. Método de reducción de escala	61

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	63
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	66
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	67
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	67
3.4.1. Población.....	67
3.4.2. Muestra.....	68
3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	68
3.5.1. Recopilación de información	68
3.5.2. Analizar la situación actual de los caudales máximos de la subcuenca Putina, en relación con la precipitación, utilizando datos históricos observados.....	71
3.5.2.1. Procesamiento de la cuenca	71
3.5.2.2. Tratamiento de información Meteorológica	78
3.5.2.3. Modelamiento hidrológico	85
3.5.2.4. Modelo HEC HMS.....	98
3.5.3. Seleccionar y aplicar modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 para obtener proyecciones de cambios en la precipitación bajo diferentes escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) en la subcuenca del río Putina	105
3.5.3.1. Recolección de datos.....	105
3.5.3.2. Post procesamiento de datos GCM.....	108



3.5.3.3. Selección del modelo GCM	110
3.5.3.4. Corrección de sesgo	115
3.5.4. Simular el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos futuros 2025-2075, mediante el modelo hidrológico HEC HMS	118
3.5.4.1. Parámetros Físicos de la Cuenca.....	118
3.5.4.2. Información Meteorológica y Reducción de Escala	119
3.5.4.3. Procesos Hidrológicos en HEC-HMS.....	120
3.5.4.4. Comparación de Resultados y Evaluación de Impactos	120

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE LA SUBCUENCA PUTINA, EN RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN, UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS OBSERVADOS	122
4.1.1. Procesamiento de la cuenca	122
4.1.2. Tratamiento de información meteorológica	125
4.1.2.1. Análisis estadístico de datos	125
4.1.3. Selección de precipitación máxima.....	133
4.1.4. Selección de las distribuciones de probabilidad.....	134
4.1.5. Precipitaciones máximas anuales en 24 horas	135
4.1.6. Hietogramas por curvas IDF para diferentes periodos de retorno	137
4.1.7. Modelo hidrológico HEC HMS	139
4.1.8. Caudales máximos	141
4.1.9. Análisis de caudales máximos observados en la cuenca Huancané.....	143



4.1.10. Caudales máximos en la subcuenca Putina	147
4.2. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DEL PROYECTO CMIP5 PARA OBTENER PROYECCIONES DE CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (RCP 4.5 Y RCP 8.5) EN LA SUBCUENCA	151
4.2.1. Recolección de datos	151
4.2.2. Post procesamiento de datos GCM	154
4.2.3. Selección del modelo	158
4.2.4. Corrección del sesgo y selección de modelo.....	170
4.2.5. Obtención de datos y proyección de cambios en la precipitación bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5	174
4.3. COMPORTAMIENTO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS EN LA SUBCUENCA BAJO LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO RCP 4.5 Y RCP 8.5 PARA LOS PERÍODOS FUTUROS 2025-2075, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO HEC HMS	191
4.3.1. Escenarios bajo RCP 4.5 en el periodo 2023 – 2075	191
4.3.2. Escenarios bajo RCP 8.5 en el periodo 2023 – 2075	199
4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN BASE A LOS OBJETIVOS.....	207
V. CONCLUSIONES.....	211
VI. RECOMENDACIONES.....	213
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
ANEXOS.....	224

Área: Recursos Hídricos

Tema: Cambio climático en el comportamiento de caudales máximos

Fecha de sustentación: 14 de noviembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Características de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP)	60
Tabla 2 Área de la cuenca por distritos.....	63
Tabla 3 Sistema fluvial para la Sub-Cuenca Putina.....	66
Tabla 4 Estaciones meteorológicas para el área de estudio	70
Tabla 5 Área y perímetro de la sub cuenca.....	73
Tabla 6 Modelos Climáticos Globales (GCM)	106
Tabla 7 Parámetros geomorfológicos	122
Tabla 8 Unidades hidrográficas generadas	123
Tabla 9 Porcentaje de datos diarios entre 01/01/1970 al 31/12/2022	126
Tabla 10 Clusters grupo 1	128
Tabla 11 Clusters grupo 2	128
Tabla 12 Parámetros obtenidos del paquete R Climatol.....	130
Tabla 13 Prueba de T y F para las estaciones	131
Tabla 14 Análisis de tendencia en la media y desviación estándar	132
Tabla 15 Prueba de datos dudosos	133
Tabla 16 Prueba Kolmogórov-Smirnov – Delta Calculado	135
Tabla 17 Comparación de precipitaciones máximas anuales por estación	136
Tabla 18 Características geomorfológicas de las subcuencas en el modelo HEC HMS	140
Tabla 19 Características geomorfológicas de los ríos en el modelo HEC HMS	140
Tabla 20 Caudales obtenidos bajo diferentes métodos de transformación, precipitación -escorrentía (m^3/s), para un periodo de retorno de 100 años	142



Tabla 21	Caudales máximos observados en la cuenca Huancané	144
Tabla 22	Distribuciones de probabilidad para cada periodo de retorno de caudales en la cuenca Huancané.....	146
Tabla 23	Caudales obtenidos para la subcuenca Putina.....	147
Tabla 24	Características de los modelos 18 GCMs empleados	152
Tabla 25	Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1785	160
Tabla 26	Resultados de métricas de evaluación de GCM para UH 1786	162
Tabla 27	Resultados de métricas de evaluación de GCM para UH 1787	164
Tabla 28	Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1788	166
Tabla 29	Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1789	168
Tabla 30	Tasa de variación (%) de la precipitación por UH, para un escenario RCP 4.5.....	175
Tabla 31	Tasa de variación (%) estacional, de la precipitación por subcuencas para un escenario RCP 4.5	177
Tabla 32	Tasa de variación (%) de la precipitación por UH, para un escenario RCP 8.5.....	183
Tabla 33	Tasa de variación (%) estacional, de la precipitación por subcuencas para un escenario RCP 4.5	185
Tabla 34	Comparación de caudales máximos para el escenario RCP 4.5, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años	195
Tabla 35	Comparación de caudales máximos para el escenario RCP 8.5, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años	203



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ajuste gráfico con la función densidad	44
Figura 2 Ajuste gráfico con la función acumulada	45
Figura 3 Hietograma de diseño por el método de bloque alterno	50
Figura 4 Hidrograma anual	51
Figura 5 Hidrograma.....	52
Figura 6 Cambio Climático.....	54
Figure 7 Esquema de regionalización	56
Figura 8 Ubicación del área de estudio.....	64
Figura 9 Unidades Hidrográficas de la Cuenca Huancané.	65
Figura 10 Polígono de Thiessen en la subcuenca del río Putina.....	70
Figura 11 Archivos de entrada para el Número de Curva	76
Figura 12 Numero curva para la sub cuenca.....	78
Figura 13 Proceso de delimitación de Cuenca en HEC HMS	99
Figura 14 Serie de tiempo de la precipitación mensual del GCM en la UH 01785..	111
Figura 15 Diagrama de cuantiles	117
Figura 16 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Putina.....	124
Figura 17 Disponibilidad de datos de precipitación histórica (observada).....	126
Figura 18 Generación de clusters por Rclimatol.....	127
Figura 19 Reconstrucción de series anómalas	129
Figura 20 Hietogramas para periodo de retorno de 50 años	137
Figura 21 Hietogramas para periodo de retorno de 100 años	138
Figura 22 Hietogramas para periodo de retorno de 200 años	138
Figura 23 Delimitación de cuenca Huancané y sub cuenca Putina en HEC HMS ...	141



Figura 24	Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 50 años ..	147
Figura 25	Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 100 años	148
Figura 26	Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 200 años	149
Figura 27	Hidrogramas de salida	150
Figura 28	Procesamiento de los límites de la cuenca, en lenguaje de programación R	153
Figura 29	Precipitación observada de PISCO a nivel de subcuencas, imagen izquierda resolución de 5km x 5km, imagen derecha suavizado de resolución.....	153
Figura 30	Recorte y visualización de la descarga de GCM	154
Figura 31	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01785	155
Figura 32	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01786.....	156
Figura 33	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01787	156
Figura 34	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01788.....	157
Figura 35	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01789	157
Figura 36	Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación - Mapa de calor de PBIAS donde W1: UH 1786; W2:UH1789; W3:1787; W4: 1785; W5:1788.	159
Figura 37	Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1785	161



Figura 38	Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1785	161
Figura 39	Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1786	163
Figura 40	Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1786	163
Figura 41	Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1787	165
Figura 42	Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1787	165
Figura 43	Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1788	167
Figura 44	Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1788	167
Figura 45	Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1789	169
Figura 46	Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1789	169
Figura 47	Sesgo de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM) para la variable de precipitación - Mapa de calor de PBIAS donde W1: UH 1786; W2:UH1789; W3:1787; W4: 1785; W5:1788.....	171
Figura 48	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01785	171



Figura 49	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01786	172
Figura 50	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01787	172
Figura 51	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01788	173
Figura 52	Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01789	173
Figura 53	Diagrama de caja comparativo de la precipitación observada vs la precipitación del escenario RCP 4.5 del GCM MIROC5 para las unidades hidrográficas de la sub cuenca Putina.	175
Figura 54	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01785	177
Figura 55	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01786	178
Figura 56	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01787	178
Figura 57	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01788	179
Figura 58	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01789	179



Figura 59	Diagrama de caja comparativo de la precipitación observada vs la precipitación del escenario RCP 8.5 del GCM MIROC5 para las unidades hidrográficas de la sub cuenca Putina.	183
Figura 60	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01785	185
Figura 61	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01786	186
Figura 62	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01787	186
Figura 63	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01788	187
Figura 64	Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01789	187
Figura 65	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 50 años	192
Figura 66	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 100 años	193
Figura 67	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 200 años	194
Figura 68	Comparación de caudales para el escenario RPC 4.5.....	196
Figura 69	Comparación de hidrogramas para un escenario RPC 4.5 en un periodo de retorno de 50, 100 y 200 años	197
Figura 70	Diferencia porcentual de hidrogramas en un escenario RPC 4.5	198
Figura 71	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 50 años	199



Figura 72	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 100 años	201
Figura 73	Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 200 años	202
Figura 74	Comparación de hidrogramas para un escenario RPC 8.5 en periodos de retorno de 50, 100 y 200 años	204
Figura 75	Comparación de hidrogramas en escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5	206



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Análisis exploratorio de datos observados	224
ANEXO 2 Gráficas de anomalías y ajustes.....	231
ANEXO 3 Series completadas	235
ANEXO 4 Análisis de estacionariedad e independencia.....	247
ANEXO 5 Curvas IDF e hietograma.....	251
ANEXO 6 Curvas IDF e hietograma para RCP 4.5	258
ANEXO 7 Curvas IDF e hietograma para RCP 8.5	264



ACRÓNIMOS

GEI:	Gases de Efecto Invernadero
GCM:	Modelos Climáticos Globales
MCR:	Modelo Climático Regional
IPCC:	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre los cambios climáticos
WCRP:	Programa Mundial de Investigaciones del Clima
EMIC:	Modelo de tierra
FR:	Forzamiento Radiativo
AOCGM:	Modelos de Circulación General Acoplados Océano – Atmosfera
MACGA:	Modelos Atmosféricos de Circulación General Acoplados
CMIP:	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados
RCP:	Trayectorias de Concentración Representativas
IGN:	Instituto Geográfico Peruano
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
ASTER:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
DEM:	Modelo Digital de Elevación
MDT:	Modelo Digital de Terreno
SNHT:	Estándar Normal Homogeneity Test
SCS:	Servicio de Conservación de suelos
HEC – HMS:	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
Kc:	Índice de Compacidad
SIG:	Sistema de Información Geográfica
IDF:	Intensidad-Duración-Frecuencia
CN:	Numero de Curva



WCRP: Climate Simulation, del World Climate Research Program

PISCO: Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological Observations



RESUMEN

El proyecto evalúa el impacto del cambio climático en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina, de la región de Puno, para los periodos futuros 2025-2075. Debido a la disminución proyectada de precipitaciones y cambios en los caudales extremos, lo que plantea retos para la adaptación ante eventos climáticos extremos. El objetivo principal es analizar los caudales máximos bajo diferentes escenarios climáticos, considerando escenarios de emisiones moderadas y altas. Para ello, se utilizaron datos históricos de precipitación (1970-2022) para simular caudales observados con el modelo HEC-HMS y realizar proyecciones de caudales futuros del modelo MIROC5 por su mejor desempeño en comparación de 18 modelos globales. Los resultados indican una disminución significativa en la precipitación anual, entre -5.6% y -8.7%, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, lo que llevó a una reducción en los caudales máximos proyectados. Para un periodo de retorno de 50 años, los caudales proyectados en RCP 4.5 (220 m³/s) y RCP 8.5 (230.9 m³/s) son inferiores a los 242.8 m³/s observados. En el caso de 100 años, se proyectaron caudales de 279.2 m³/s en RCP 4.5 y 298.1 m³/s en RCP 8.5, frente a 310.10 m³/s observados. Para 200 años, los caudales proyectados disminuyen a 350 m³/s en RCP 4.5 y 356.8 m³/s en RCP 8.5, siendo el caudal observado 391.9 m³/s. El estudio concluye que la evaluación realizada sobre el cambio climático, reducirá la magnitud de los caudales máximos, afectando la gestión de infraestructuras resilientes y la adaptación ante fenómenos extremos.

Palabras clave: Cambio climático, caudales máximos, subcuenca del río Putina, modelos hidrológicos, proyecciones climáticas.



ABSTRACT

The project evaluates the impact of climate change on the peak flows of the Putina River sub-basin, located in the Puno region, for the future periods 2025-2075. The projected decrease in precipitation and changes in extreme flows pose challenges for adaptation to extreme climatic events. The main objective is to analyze peak flows under different climate scenarios, considering moderate and high emission scenarios. Historical precipitation data (1970-2022) were used to simulate observed flows with the HEC-HMS model and to project future flows using the MIROC5 model, selected for its better performance compared to 18 global models. The results indicate a significant decrease in annual precipitation, ranging from -5.6% to -8.7% under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, leading to a reduction in projected peak flows. For a 50-year return period, the projected flows under RCP 4.5 (220 m³/s) and RCP 8.5 (230.9 m³/s) are lower than the observed 242.8 m³/s. For a 100-year return period, projected flows are 279.2 m³/s in RCP 4.5 and 298.1 m³/s in RCP 8.5, compared to the observed 310.10 m³/s. For a 200-year return period, projected flows decrease to 350 m³/s in RCP 4.5 and 356.8 m³/s in RCP 8.5, while the observed flow is 391.9 m³/s. The study concludes that climate change will reduce the magnitude of peak flows, impacting the management of resilient infrastructure and adaptation to extreme events.

Keywords: Climate change, peak flows, Putina River sub-basin, hydrological models, climate projections.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cambio climático ha surgido como una de las principales preocupaciones a nivel mundial, debido a sus profundos impactos tanto en los sistemas naturales como en las actividades humanas. Uno de los efectos más significativos de este fenómeno es la modificación de los patrones de precipitación, lo que influye de manera directa en la frecuencia y magnitud de eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y sequías severas. Estos eventos aumentan considerablemente el riesgo de inundaciones y alteran el comportamiento de los caudales máximos en las cuencas hidrográficas. La gestión de los recursos hídricos debe adaptarse a estas nuevas condiciones, y las regiones vulnerables, como la subcuenca del río Putina, deben implementar medidas de adaptación para enfrentar estos cambios. Las cuencas y subcuencas, que dependen en gran medida de los ciclos de precipitación y escorrentía, son especialmente susceptibles a estas variaciones, lo que plantea retos para su manejo frente a eventos extremos.

En este contexto, la subcuenca delimitada en el río Putina, ubicada en la región altiplánica de Puno, enfrenta una creciente vulnerabilidad debido a los impactos del cambio climático. La ciudad depende del agua para actividades esenciales como la agricultura, el suministro de agua potable y el desarrollo económico de las comunidades locales, sin embargo, la falta de estudios detallados sobre cómo el cambio climático afecta específicamente esta subcuenca, que limita la capacidad de las autoridades para tomar decisiones informadas que fortalezcan la adaptación a eventos extremos. Ante esta situación, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo diversos escenarios climáticos proyectados a partir de los Modelos Climáticos Globales (GCM) del Proyecto de



Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), con especial énfasis en los posibles impactos de eventos extremos.

El enfoque principal de este trabajo se centra en dos vertientes: primero, el análisis de los caudales históricos en relación con los patrones de precipitación observados; y segundo, la proyección de los caudales máximos bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, que representan trayectorias diferenciadas de concentración de gases de efecto invernadero. Estos modelos permitirán estimar los posibles impactos del cambio climático en la subcuenca durante los periodos comprendidos entre 2025 y 2075. Para ello, se utilizarán herramientas de modelado hidrológico, como el HEC-HMS, que simularán el comportamiento futuro de los caudales máximos en diferentes condiciones climáticas y facilitarán la comparación con los datos históricos existentes.

Este tipo de análisis es crucial para generar información precisa sobre las posibles fluctuaciones en los caudales extremos, lo que tiene implicaciones directas en la planificación de infraestructuras resilientes y en la formulación de políticas de adaptación al cambio climático. Por consiguiente, los resultados de esta investigación contribuirán a mejorar la comprensión de los efectos del cambio climático en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina, esto servirá como base para desarrollar estrategias de adaptación climática que permitan mitigar los impactos de eventos extremos y fortalecer la resiliencia de la ciudad de Putina ante las amenazas del cambio climático. La información generada será útil, proporcionando una base científica para la planificación sostenible de infraestructuras y como parte de la gestión del agua en condiciones climáticas cambiantes.

Del mismo modo, el presente proyecto de investigación se divide en 4 capítulos, que se enumeran:



El capítulo I, introducción, establece el problema de estudio, enunciando del problema, hipótesis, justificación y definiendo los objetivos logrados que contempla el estudio. El capítulo II, manifiesta argumentos relacionados al tema de estudio, referencias del estudio, bases y marco teórico en los cuales se basó el presente proyecto. El capítulo III, en donde se contempla la metodología del estudio el cual especifica el tipo y diseño de estudio, técnicas e instrumentos, población y muestra, métodos y procesamiento de información. Finalmente, en el capítulo IV, el cual contempla los resultados logrados, y su discusión respectivamente. Además, contiene las conclusiones con recomendaciones y referencias bibliográficas.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es una realidad innegable que afecta tanto a los sistemas naturales como a las sociedades. Una de las consecuencias más preocupantes es la variación en los patrones de precipitación y el aumento de eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones, lo que genera un impacto significativo en la hidrología de las cuencas hidrográficas a nivel mundial. Esta variabilidad climática incrementa la vulnerabilidad de las regiones dependientes del agua, donde fenómenos extremos pueden poner en riesgo la infraestructura y la capacidad de adaptación de las comunidades (Pachauri y Meyer, 2015). Según estudios realizados en la región andina, las variaciones en los patrones de precipitación inducidas por el cambio climático pueden alterar el comportamiento de los caudales de los ríos, agravando los riesgos para las cuencas hidrográficas (Lavado y Espinoza, 2014).

En el caso particular de la subcuenca del río Putina, el cambio climático ha suscitado serias preocupaciones sobre la adaptación ante eventos extremos. Esta subcuenca depende de sus recursos hídricos para actividades como el abastecimiento de



agua, la agricultura y el desarrollo económico. No obstante, el cambio climático está alterando los caudales en esta subcuenca, lo cual introduce incertidumbre en la capacidad de adaptación de la infraestructura hidráulica y aumenta el riesgo de eventos extremos como inundaciones (Magrin et al., 2014). A nivel global, se ha documentado que las regiones andinas, incluidas las del sur del Perú, son particularmente vulnerables a las alteraciones en los patrones hidrológicos y la exposición a fenómenos climáticos intensos.

A pesar de la relevancia de esta problemática, existe una limitada cantidad de estudios que aborden específicamente el impacto del cambio climático en los caudales máximos en la región de Puno. Los estudios previos se han centrado en cuencas mayores, mientras que la subcuenca del río Putina, que posee características hidrográficas únicas, ha sido poco investigada. Esta falta de información precisa a escala local impide una comprensión clara de cómo el cambio climático está afectando los caudales máximos en la región, lo que representa un vacío de conocimiento crucial para el diseño de medidas de adaptación eficaces (Huerta y Lavado, 2021).

Es necesario emplear modelos climáticos globales y técnicas estadísticas para obtener proyecciones de cambios en la precipitación y modelos hidrológicos como el HEC-HMS para simular los caudales futuros en la subcuenca. Estos modelos permiten proyectar escenarios climáticos futuros bajo diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5), generando un entendimiento más preciso de cómo se espera que cambie la hidrología en la subcuenca del río Putina. Diversos estudios han demostrado la utilidad de los modelos climáticos globales para estimar cambios en la precipitación y su impacto en los sistemas hídricos (León et al., 2019), lo que hace urgente su aplicación en cuencas como la del Putina para abordar la problemática de adaptación ante eventos extremos.



Por tanto, se requiere evaluar el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo diferentes escenarios del cambio climático, utilizando datos históricos y proyectados. Esto permitirá identificar los cambios en los caudales a lo largo del tiempo y establecer patrones que sirvan de base para la planificación de infraestructuras resilientes y la adaptación ante fenómenos extremos. La evaluación de estos caudales es crucial no solo para el desarrollo de estrategias de adaptación, sino también para la prevención de desastres asociados a inundaciones y la mejora en el diseño de infraestructura como defensas ribereñas y puentes (Manzanilla et al., 2018).

En conclusión, el problema central radica en la necesidad de evaluar el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo diferentes escenarios del cambio climático, con el fin de desarrollar medidas de adaptación ante los efectos del cambio climático. Esta investigación permitirá cerrar un vacío de conocimiento existente y aportará información relevante para la planificación de infraestructura y políticas públicas que promuevan la resiliencia frente a los impactos del cambio climático en la subcuenca del río Putina.

1.1.1. Problema general

¿Cómo afectará el cambio climático, bajo los escenarios del CMIP5, en el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la situación actual de los caudales máximos en la subcuenca Putina en relación con la precipitación histórica observada?
- ¿Cómo se espera que cambien las precipitaciones en la subcuenca Putina en el futuro bajo diferentes escenarios de cambio climático del CMIP5?



- ¿Qué impacto tendrán las variaciones proyectadas en la precipitación sobre los caudales máximos en la subcuenca del río Putina?

1.2. HIPÓTESIS

1.2.1. Hipótesis general

El cambio climático, bajo escenarios del CMIP5 alterará significativamente el comportamiento en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina, disminuyendo la magnitud de los eventos extremos de caudales.

1.2.2. Hipótesis específicas

- Existe una relación significativa entre los patrones de precipitación histórica y los caudales máximos en la subcuenca del río Putina, donde la disminución en la precipitación se traduce en una reducción de los caudales máximos.
- Los modelos climáticos globales del CMIP5 proyectan una disminución de las precipitaciones para la subcuenca Putina.
- El cambio climático bajo escenarios del CMIP5 provocara una disminución en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina, durante los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El cambio climático está generando impactos sustanciales en los sistemas hidrológicos a nivel mundial, afectando la disponibilidad y distribución del agua. Estos cambios en el acceso al recurso hídrico repercuten en actividades críticas como el riego agrícola y el suministro de agua para consumo humano. Uno de los efectos más notables del cambio climático es la alteración de los patrones de precipitación y temperatura, que a su vez provoca variaciones en los caudales de los ríos, incrementando el riesgo de



inundaciones y eventos hidrológicos extremos, así como la escasez de agua en ciertas regiones (Manzanilla et al., 2018).

En este contexto, los GCM, como los desarrollados en el marco del CMIP5, se han convertido en una herramienta clave para proyectar los cambios futuros en precipitación y temperatura bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5). La aplicación de estos modelos en cuencas hidrográficas proporciona información crucial sobre cómo el cambio climático impactará los recursos hídricos, lo que es fundamental para la planificación y gestión del agua en un escenario de incertidumbre climática creciente.

Aunque existen numerosos estudios globales sobre los efectos del cambio climático en los sistemas hídricos, las cuencas altoandinas del Perú, como la subcuenca del río Putina, han sido poco exploradas en términos de cómo el cambio climático impactará sus caudales máximos. Los estudios previos han identificado vulnerabilidades en la vertiente del Titicaca (Huerta y Lavado, 2021), pero se carece de investigaciones que analicen específicamente cómo las proyecciones climáticas bajo CMIP5 afectan los caudales máximos, información que es esencial para el diseño de infraestructura y para la gestión del riesgo de inundaciones.

El principal aporte de este estudio radica en la evaluación específica del impacto del cambio climático en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina utilizando proyecciones de CMIP5 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. A diferencia de estudios previos que se han centrado en análisis generalizados de cuencas mayores, esta investigación proporcionará proyecciones detalladas de la variación de caudales extremos en una región particular. Además, la simulación de caudales futuros con el modelo HEC-HMS permitirá obtener estimaciones más precisas, fundamentales para el diseño de



infraestructuras hidráulicas, como puentes y defensas ribereñas, y para la implementación de estrategias de adaptación al cambio climático en la cuenca.

La investigación también llenará un vacío crítico al establecer una relación cuantitativa entre las proyecciones de precipitación futura y los caudales máximos en la cuenca, información que actualmente no está disponible en esta región. Este conocimiento contribuirá al desarrollo de la gestión de los recursos hídricos en el altiplano, y será útil para otras regiones andinas con características similares.

Este estudio es particularmente relevante debido a que proporcionará información nueva sobre la afectación del cambio climático en los caudales máximos de la subcuenca del río Putina, una región con vulnerabilidad climática. Los resultados tendrán un impacto directo en la planificación de infraestructuras hidráulicas, en la gestión del riesgo de eventos extremos y en la adaptación al cambio climático.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático bajo escenarios del CMIP5 en el comportamiento de caudales máximos para la subcuenca del río Putina.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la situación actual de los caudales máximos de la subcuenca Putina en relación con la precipitación, utilizando datos históricos observados.
- Seleccionar y aplicar modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 para obtener proyecciones de cambios en la precipitación bajo diferentes



escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) en la subcuenca del río Putina

- Simular el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos futuros 2025-2075, mediante el modelo hidrológico HEC HMS



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

Diversos estudios internacionales han evaluado el comportamiento de los caudales máximos bajo escenarios de cambio climático utilizando datos de precipitación en distintas subcuencas hidrográficas. En primer lugar, uno de los estudios más relevantes es el de Gao et al. (2020), quienes analizaron los impactos del cambio climático en los caudales de la cuenca del Yangtze en China. Utilizaron los modelos hidrológicos SWAT y VIC para simular los caudales bajo distintos escenarios de cambio climático, encontrando que los caudales máximos aumentarían significativamente en el futuro, lo que refleja un posible aumento en los eventos extremos de inundación.

Otro estudio importante es el de Adeyeri et al. (2020), quienes evaluaron el impacto del cambio climático en la cuenca de los ríos Ogun y Osun en Nigeria. Utilizando técnicas de downscaling estadístico para proyectar los escenarios futuros de precipitación y temperatura, aplicaron el modelo hidrológico HEC-HMS para analizar los efectos en los caudales, hallando que la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura afectarían significativamente la generación de caudales.

En Sudamérica, Parrado y Vivas (2018) realizaron una evaluación de caudales máximos en la cuenca del río Blanco Negro Guayuriba en Colombia, utilizando el modelo HEC-HMS en el contexto del cambio climático. Sus



resultados mostraron una reducción en los caudales máximos para un periodo de retorno de 50 años, lo que sugiere una disminución de la esorrentía en el futuro.

En Costa Rica, Alvarado (2020) evaluó una microcuenca urbana bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 (2006-2050), utilizando datos de precipitación proyectada para calcular los caudales máximos en periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Los resultados indicaron que los caudales proyectados fueron superiores a los observados. De igual manera, Hidalgo et al. (2021), en otro estudio en Costa Rica, evaluaron el impacto del cambio climático en la esorrentía, concluyendo que el futuro será más seco y cálido, lo que reducirá la esorrentía de forma significativa.

2.1.2. Nacionales

En Perú, diversos estudios han abordado los efectos del cambio climático en las cuencas hidrográficas. Pino et al. (2022) estudiaron la Quebrada del Diablo en Tacna, donde utilizaron 15 modelos climáticos y técnicas de mapeo de quintiles para corregir el sesgo en las proyecciones de precipitación y temperatura bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados indicaron un aumento de la precipitación máxima anual en un 30%, y un incremento de los caudales máximos en un 220% para el escenario RCP 4.5 y 234% en el escenario RCP 8.5, lo que representa un riesgo significativo para la población cercana.

Por otro lado, Lizárraga et al. (2020) analizaron el impacto del cambio climático en la cuenca del río Santa en la Cordillera Blanca, utilizando el modelo hidrológico SWAT para simular los caudales bajo escenarios del CMIP5. Los resultados indicaron un incremento del 25% en los caudales máximos para el escenario RCP 8.5 hacia finales del siglo XXI. Díaz et al. (2018), en su estudio de



la cuenca del río Lurín, también utilizaron el modelo SWAT y encontraron un aumento del 10% en los caudales bajo el escenario RCP 8.5 hacia el final del siglo.

En el norte de Perú, La Cruz et al. (2019) utilizaron modelos del CMIP5 para proyectar cambios en la precipitación y temperatura en la cuenca del río Chancay-Lambayeque, concluyendo que se espera un aumento en la frecuencia y magnitud de los caudales máximos, lo que podría afectar negativamente a la infraestructura local.

Finalmente, Chávez et al. (2018) evaluaron el impacto del cambio climático en la cuenca del río Jequetepeque utilizando el modelo SWAT, proyectando un aumento en los caudales máximos, lo que podría generar problemas de inundación y erosión.

2.1.3. Regionales

En la región de Puno, la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2010) realizó un estudio exhaustivo sobre los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Huancané y Suches, donde en la cuenca del río Huancané, de la cual la subcuenca generadora del río Putina forma parte, para delimitar las unidades hidrográficas de la cuenca Huancané, se empleó la metodología de Pfafstetter, que permite una subdivisión detallada de una cuenca en sus principales afluentes. Dentro de esta estructura, la subcuenca del río Putina contiene varias subcuencas clave, entre ellas Muñani (UH 1786), Pistune (UH 1788) y Alto Huancané (UH 1789). Para estimar los caudales máximos aplicaron el método del hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), considerando precipitaciones máximas en un periodo de 24 horas entre los años 1956 y 2009 (54 años). La falta de datos hidrométricos en estas subcuencas hizo necesario el



uso de este método para modelar caudales máximos bajo diferentes periodos de retorno. Los resultados indicaron que, en la UH 1786, se presentan caudales de 148.4 m³/s, 176.7 m³/s y 201.9 m³/s para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años, respectivamente. En la UH 1788, se obtuvieron caudales de 108.7 m³/s para 50 años, 127.7 m³/s para 100 años y 146.8 m³/s para un retorno de 200 años. Finalmente, en la UH 1789, los caudales proyectados fueron de 81.0 m³/s, 98.7 m³/s y 116.6 m³/s para los mismos periodos de retorno.

En un estudio más reciente, Carcasi (2021) utilizó datos de precipitación diaria máxima entre 1977 y 2019 en la subcuenca del río Putina y aplicó el método racional modificado, obteniendo un caudal máximo de 445.95 m³/s para un periodo de retorno de 100 años. Además, Condori y Itusaca (2017) estimaron un caudal de 237.94 m³/s para el mismo periodo de retorno utilizando el hidrograma unitario triangular.

El estudio de Lujano et al. (2016) evaluó los cambios en la disponibilidad hídrica en el altiplano peruano utilizando modelos del CMIP5 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, concluyendo que se espera una reducción de la precipitación en la mayor parte del altiplano bajo el escenario RCP 4.5, mientras que se proyectan incrementos en el norte y disminuciones en el sur bajo el escenario RCP 8.5.

Finalmente, estudios como los de Sardón (2021) y Linares (2020) han utilizado modelos climáticos como MIROC5 para analizar el impacto del cambio climático en los caudales de las cuencas de los ríos Huancané y Lampa, respectivamente, encontrando reducciones en la precipitación y aumentos en la variabilidad hidrológica.



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Análisis hidrológico

2.2.1.1. Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad natural definida por la existencia de una divisoria de aguas en un territorio dado, la cual establece sus límites. Estas cuencas son consideradas unidades morfográficas superficiales, cuyas fronteras quedan delimitadas por la divisoria geográfica principal que separa las aguas de las precipitaciones, comúnmente conocida como parteaguas. El parteaguas es, en teoría, una línea imaginaria que conecta los puntos de máxima altitud entre dos laderas adyacentes pero opuestas en exposición, extendiéndose desde el punto más alto de la cuenca hasta su zona de emisión, localizada en el punto hipsométricamente más bajo. Dentro de las cuencas se pueden definir subcuencas o cuencas de orden inferior, cuyas divisorias son conocidas como parteaguas secundarios (Gámez, 2010).

Asimismo, Aparicio (1989) describe una cuenca como una región de la superficie terrestre en la que, si fuera completamente impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella serían drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

2.2.1.2. Morfología de la cuenca

Según Cahuana y Yugar (2009), la geomorfología de una cuenca queda definida por su forma, relieve y drenaje, para lo cual se ha establecido una serie de parámetros; que, a través de ecuaciones



matemáticas, sirven de referencia para la clasificación y comparación de cuencas.

Para un mejor estudio de las cuencas se han establecido los siguientes parámetros:

- Parámetros de forma.
- Parámetros de relieve.
- Parámetros de red hidrográfica.

a) Parámetros de forma

- **Área de la cuenca**

Es la región o área proyectada horizontalmente de toda el área de drenaje de una cuenca, siendo esta característica geomorfológica la más importante pues influye directamente en la cantidad de agua que la cuenca puede producir y por ende en la magnitud de los caudales de los cursos de agua (Villón, 2002).

- **Perímetro**

Según, Reyes (2010), el perímetro de la cuenca o la longitud del parteaguas de la cuenca, es un parámetro importante, que en conexión con el área nos permite inferir sobre la forma de la cuenca.

El área se calcula a partir de carta topográfica mediante instrumentos como planímetro, a través de la digitalización planimetría de la carta en un sistema CAD, mientras que el perímetro puede ser obtenido con la ayuda de un curvímetro o también a través de sistemas CAD.

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

El coeficiente de forma es un indicador adimensional que se utiliza para describir la forma de una cuenca hidrográfica, basado en la relación entre el perímetro de la cuenca y el área de un círculo equivalente, es decir, uno que tenga la misma área que la cuenca. Cuanto mayor sea el coeficiente de forma, más distante estará la forma de la cuenca de ser circular. Esto se expresa mediante la siguiente ecuación (Reyes, 2010).

$$K_c = 0.282 * \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Donde:

K_c : Índice de la compacidad o índice de Gravelius (Adimensional).

P: Perímetro de la cuenca (km).

A: Área de la cuenca (km²).

- **Factor de Forma (F)**

Es la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (L_m). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según su comportamiento, si tiende hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca. Un valor de (F) superior a la unidad indica el grado de achatamiento de la cuenca o la existencia de un río principal corto, lo que provoca una mayor tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa, generando grandes crecidas de manera

rápida. Este comportamiento se define mediante la siguiente ecuación (Reyes Trujillo, 2010).

$$F = \frac{A}{L_m^2}$$

Donde:

F: Factor de forma (adimensional).

A: Área de la cuenca (km²).

L_m: Longitud de máximo recorrido (km).

b) Parámetros de relieve

- **Pendiente de la cuenca**

Según Aparicio (1989), los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. La pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente, dividido entre su longitud medida en planta.

$$S_m = \frac{H}{L}$$

Donde:

S_m: Pendiente media del cauce principal.

H: Desnivel total (cota en la parte más alta del cauce – cota en la parte más baja del cauce)

L: Longitud del cauce principal.



2.2.1.3. Máximas avenidas

Se puede denominar una máxima avenida a un evento donde la capacidad de transporte de un canal es sobrepasada por el caudal de escorrentía superficial, produciendo inundaciones de tierras aledañas (Linsley, 1975).

2.2.1.4. Precipitación

En meteorología, cualquier forma de agua que cae del cielo se denomina precipitación y constituye una parte importante del ciclo hidrológico. Además, es fundamental para muchas obras de ingeniería que dependen de este fenómeno para un dimensionamiento adecuado. El conocimiento sobre precipitaciones extremas de corta duración es esencial para el diseño de sistemas de drenaje y la prevención de inundaciones. Las características de la precipitación que deben considerarse incluyen la intensidad y la duración de la lluvia (Gámez, 2010)

2.2.1.5. Precipitación máxima probable

Se podría entender como la máxima profundidad de lluvia observada y estimada para una duración dada en un determinado periodo de retorno de una región. En ciertas estructuras hidráulicas estas son propensas a fallas que ocasionan daños catastróficos, donde se debe seleccionar el caudal máximo probable para una seguridad absoluta, siendo este caudal máximo probable consecuencia de la precipitación máxima probable, siendo de importancia estudios hidrológicos con estimaciones del límite superior posible de precipitación (Gutiérrez, 2014).



Gómez (2010), nos dice que, para calcular la lluvia esperada, se toman los datos de precipitación de una estación meteorológica ya sea a nivel diario, mensual o anual de varios años, con los cuales se les da un tratamiento de orden de mayor a menor y se le aplica una probabilidad de ocurrencia con la siguiente formula:

$$Pe(X > Xm) = \frac{m}{n + 1} - 100$$

Donde:

Pe: Probabilidad empírica de ocurrencia, en %

m: Número de orden

n: Número total de observaciones

2.2.1.6. Periodo de retorno

Según Villón (2006), el Periodo de retorno (T), es un intervalo de tiempo en años, donde un evento de magnitud x, podría ser excedido o igualado una vez por lo menos en promedio. Se puede decir que si para un evento igual o mayor a x, ocurre por lo menos una vez en T años, tiene su probabilidad de ocurrencia P igual a 1 en T casos, como se detalla a continuación:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)}$$



donde:

$P(X \geq x)$: Probabilidad de ocurrencia de un evento $\geq x$

T : Periodo de retorno

Cuando la probabilidad de el evento x no ocurra, esta se expresa como:

$$P(X < x) = 1 - P(X \geq x)$$

De donde:

$$P(X < x) = 1 - \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{1 - P(X < x)}$$

donde:

T = Periodo de retorno

$P(X \geq x)$ = Probabilidad de excedencia

$P(X < x)$ = Probabilidad de no excedencia

2.2.1.7. Análisis de Frecuencias de precipitaciones

El análisis de frecuencia establece una relación inversa entre la magnitud de los eventos extremos y su frecuencia de ocurrencia a través de distribuciones de probabilidad. Los sistemas hidrológicos suelen estar influenciados por estos eventos extremos, lo que hace que el análisis de frecuencia sea ampliamente utilizado en ingeniería para estudiar flujos



crecientes. Es crucial que los datos hidrológicos cumplan con las suposiciones de distribución idéntica e independencia (Chow et al. 1994).

2.2.1.8. Funciones de distribución de Probabilidad

Una distribución de probabilidad, viene a ser una función que simboliza la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria, existen diversas funciones de distribución, dentro de la hidrología las más usadas son las siguientes:

- Distribución Normal o gaussiana
- Distribución Log Normal de dos parámetros
- Distribución Gumbel o extrema tipo I
- Distribución Gamma de tres parámetros o Pearson tipo III
- Distribución Log Gamma o Log Pearson de 3 parámetros (log Pearson tipo III)

2.2.1.9. Pruebas de bondad de ajuste

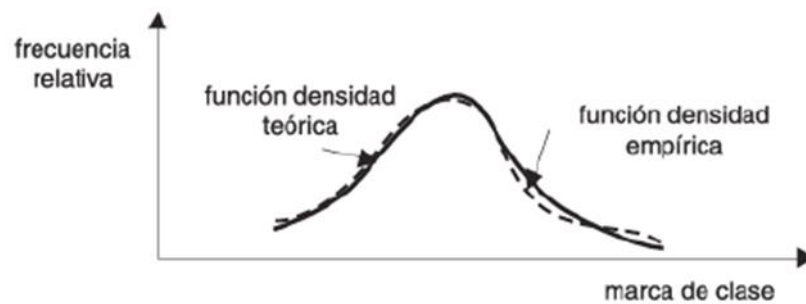
Se dice que, mediante pruebas estadísticas, se determina qué tan conveniente es el ajuste de una distribución de probabilidades. Estas pruebas son análisis estadísticos de los cuales no se puede ignorar el resultado físico de los ajustes (Gutiérrez, 2014). Por otro lado, Villón (2006) señala que la prueba de bondad de ajuste consiste en realizar una verificación, ya sea estadística o física, con el propósito de medir la certeza de una población mediante una hipótesis estadística. Las pruebas más utilizadas son el ajuste gráfico y el estadístico, dentro del cual se destacan la prueba de Chi-cuadrado y la de Kolmogórov-Smirnov.

a) Ajuste gráfico

El análisis gráfico consiste en comparar gráficamente el histograma o función densidad empírica con la función de densidad teórica de una serie de datos, y tomar un criterio de evaluación visual si existe o no un ajuste con la gráfica ya sea si son similares o si existe una diferencia (Villón, 2006). Usualmente se recurre a la comparación de la función densidad de probabilidad o la distribución acumulada, esta comparación gráfica indica las zonas donde el ajuste es deficiente mediante una visualización rápida (Varas y Bois, 1998)

Figura 1

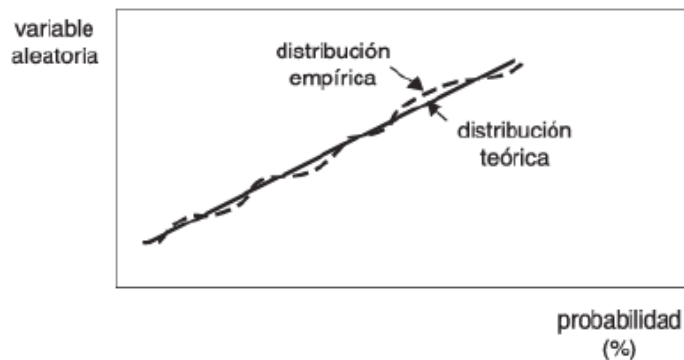
Ajuste gráfico con la función densidad



Nota: Extraído de Villón (2006).

Figura 2

Ajuste gráfico con la función acumulada



Nota: Extraído de Villón (2006).

b) Ajustes estadísticos

Para Cahuana y Morales (2009), los ajustes estadísticos, tienen por objeto evaluar y calificar como una variable aleatoria se distribuye según una función de probabilidades, las pruebas más usadas en hidrología son las siguientes:

- **Prueba Chi-Cuadrado x2**

La prueba de Chi-cuadrado es un test aplicable a cualquier tipo de distribución que se haya sometido al método de máxima verosimilitud y es el más utilizado para valorar la bondad de ajuste de un modelo (Varas y Bois, 1998). Generalmente se utiliza para verificar la bondad de ajuste entre una distribución empírica y una teórica conocida, interpretándose como el cálculo de frecuencias, ya sean esperadas u observadas, para intervalos previamente definidos (Villón, 2006). La expresión matemática correspondiente está dada por:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^k \theta_i = \sum_{i=1}^k e_i = N$$

χ_c^2 = valor calculado de Chi-Cuadrado a partir de los datos.

θ_i = número de valores observados en el intervalo de clase i .

e_i = número de valores esperados en el intervalo de clase i .

k = número de intervalos de clase.

Será aceptable el ajuste cuando el valor de Chi-cuadrado sea menor o igual al valor teórico de la distribución con cierto nivel de significación.

(Varas y Bois, 1998)

$$\chi_c^2 \leq \chi_t^2$$

- **Prueba de Kolmogórov-Smirnov**

La prueba de Kolmogórov-Smirnov se trata de comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica con la probabilidad teórica, de los datos de muestra, seleccionando el valor absoluto del valor máximo de la operación de diferencia entre valor observado y teórico (Villón, 2006).

$$\Delta = \text{máx} |F(x) - P(x)|$$

Donde:

Δ = estadístico de Kolmogórov-Smirnov.



$F(x)$ = probabilidad de la distribución teórica.

$P(x)$ = probabilidad experimental o empírica de los datos.

para realizar el ajuste primeramente se calcula la probabilidad empírica o experimental con la fórmula de Weibull (Villón, 2006):

$$P(x) = \frac{M}{N + 1}$$

Donde P(x) es la probabilidad empírica, M es el número de orden y N es el número de datos. Posteriormente se calcula la probabilidad teórica F(x), para ello se usa los modelos teóricos o las tablas elaboradas.

2.2.1.10. Tormentas de diseño/precipitación de diseño

Según, Chow et al. (1994), “una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta”, los cálculos de estas tormentas pueden elaborarse mediante la información histórica de precipitación o utilizando la precipitación en regiones adyacentes.

2.1.1.11. Relaciones Intensidad – Duración - Frecuencia

En una tormenta de diseño participan tres variables importantes, estas son la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno, existen casos donde existen curvas estándar de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), designadas para algunos lugares específicos. Cuando existe información de lluvia, se puede utilizar el análisis de frecuencia a una distribución probabilística (Chow et al., 1994).



a) Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

Las curvas IDF se identifican en plano cartesiano donde en el eje de las abscisas se encuentra la duración y en el eje de las ordenadas va la intensidad (mm/h), se puede representar mediante expresiones matemáticas como la utilizada en los EE.UU (Cahuana y Yugar, 2009), que se muestra a continuación:

$$i = \frac{KT^a}{D^b}$$

Donde:

i : Intensidad máxima en mm/hora.

a, b y K : Parámetros.

D : Duración de la precipitación en minutos.

En un trabajo realizado por Vargas (1998), utilizaron la ecuación de Kothyari y Garde, ajustaron la ecuación para tomar en cuenta los números de días tormentosos, donde desarrollaron la siguiente ecuación:

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d N^e$$

Donde

I = intensidad media en mm/h

T = tiempo de retorno en años

t = duración en horas

M = Promedio valor máximo anual de precipitación diaria



N = promedio de número de días con lluvia

a, b, c, d y e son coeficientes determinados por análisis de regresión

2.1.1.12. Hietograma de precipitación

En una tormenta de diseño participan tres variables importantes

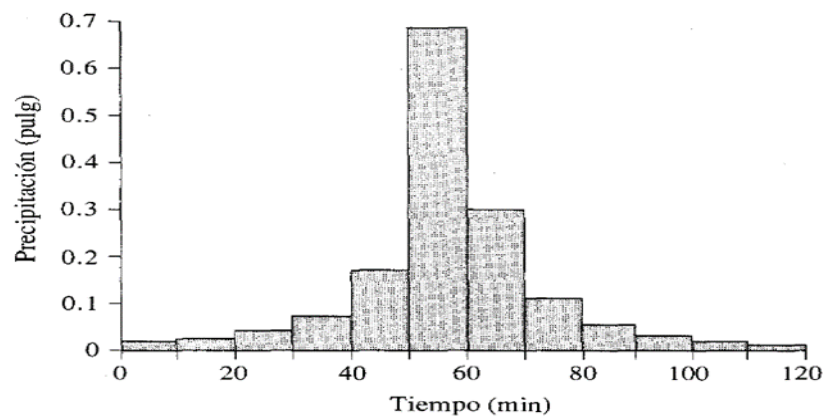
Para una distribución temporal de precipitación se requiere de predicciones confiables de hietograma de diseño para así poder obtener hidrogramas de diseño, dentro de los métodos de diseño desarrollados tenemos el método del bloque alterno (Chow et al., 1994).

a) Método de Bloque Alterno

El método de bloque alterno permite elaborar el hietograma de diseño con la curva IDF, a través del periodo de retorno seleccionado, la intensidad es leída en la curva IDF para cada n duración, con esto la profundidad de precipitación resulta de multiplicar la intensidad con la duración (Chow et al., 1994). De las diferencias entre valores consecutivos se obtiene la cantidad de profundidad de precipitación, que se adicionara por cada unidad adicional de tiempo, todos estos bloques serán ordenados en una secuencia temporal, para que la intensidad máxima se desarrolle en el centro de la duración requerida y los demás bloques se vayan formando en orden descendente alternativamente en la derecha e izquierda del bloque central.

Figura 3

Hietograma de diseño por el método de bloque alterno



Nota: Extraído de Chow et al. (1994)

2.1.1.13. Relación Lluvia - Escurrimiento

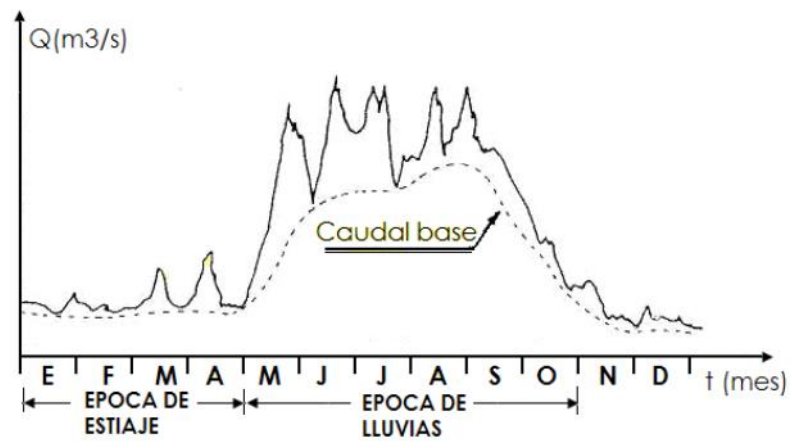
Los datos de escurrimiento en un punto específico son requeridos para conocer el caudal de diseño, existen ocasiones donde no se cuenta con la información requerida, o se presentan cambios en las condiciones de drenaje, lo que ocasiona que los datos de gasto reunidos no sean muy útiles. En tal sentido se utilizan diversos métodos de transformación de lluvia en escurrimiento, que, una vez estudiado el régimen de precipitaciones de una cuenca, estimando sus pérdidas con algún modelo disponible para hallar la lluvia neta o efectiva, esta es transformada en escurrimiento o caudal (Cahuana y Yugar, 2009).

a) Hidrogramas

El hidrograma es un método estadístico de transformación lluvia – escurrimiento, viene a ser una gráfica que representa las variaciones de caudal en relación al tiempo, en orden cronológico para un lugar dado (Cahuana y Yugar, 2009).

Figura 4

Hidrograma anual

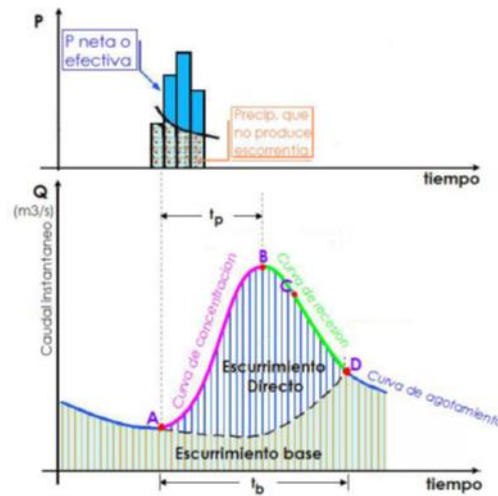


Nota: Extraído de Cahuana y Yugar (2009).

Una precipitación produce infiltración posteriormente escorrentía que es conocida como precipitación neta o efectiva. El tiempo pico de un hidrograma es el tiempo que demora desde el inicio hasta el escurrimiento pico, mientras que el tiempo base es el intervalo de tiempo que dura desde el comienzo hasta el fin del escurrimiento (Cahuana y Yugar, 2009).

Figura 5

Hidrograma



Nota: Extraído de Cahuana y Yugar (2009).

b) Modelo de simulación en hidrología superficial HEC HMS

El HEC HMS (Hydrologic Modeling System – Hydrologic Engineering Center), es un software libre, que fue desarrollado por el Cuerpo de ingenieros del ejército de EE.UU., este software permite simular procesos de precipitación – escorrentía de cuencas dendríticas. La modelización del programa puede representar diversas cantidades de cuencas diferentes, cada modelo de cuenca se elabora con la separación del ciclo hidrológico en partes manejables y con la definición de límites en torno a la cuenca de interés (Cisneros et al., 2012).

El uso del HEC-HMS, requiere un análisis previo de la cuenca en estudio, donde ya se halla caracterizado datos de prioridad como son la cuenca y subcuencas, pendientes, red de drenaje, precipitación máxima, Numero de Curva (CN) y otros, con toda esa información se poder aplicar



la modelación hidrológica con el HEC-HMS y obtener respuestas graficas o tabuladas.

En el modelo HEC HMS, se desarrollan los procedimientos utilizados en la modelación por el método de Crark, si existe la disponibilidad de datos de caudal y precipitación, Tc y R se calculan en primera aproximación, para luego por optimización de parámetros usando el HMS se ajustan el Tc y R (Fattorelli y Fernández, 2011).

2.2.2. Cambio climático global y modelos climáticos CMIP5

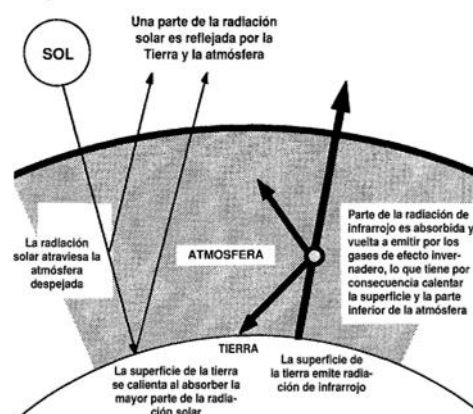
2.2.2.1. Cambio climático

El cambio climático según, Barros (2004), nos explica que mediante la radiación electromagnética que genera el sistema solar, una parte es reflejada al exterior del espacio, y la otra permanece retenida por el planeta, la mayor parte de la radiación que no es absorbida por los gases de la atmosfera, tienden a ser reflejados entre la superficie terrestre, las nubosidades y la propia atmosfera, ya con una distinta longitud de onda, con excepción a la de la ventana de radiación, la mayor parte de la radiación terrestre queda atrapada en la atmosfera, asimilándose al comportamiento de un invernadero como si fuese un vidrio que deja entrar la radiación solar y evita que salga el reflejo de la radiación terrestre, produciendo que la temperatura interior de la superficie incremente. Así mismo nos da a entender que la atmosfera está compuesta naturalmente por el dióxido de carbono, el metano, el agua y el óxido nitroso, cuya propiedad de estos es la de absorber una parte de la radiación mientras que la demás sale a través de la ventana de radiación, sin embargo, si la

concentración es excesiva retiene más cantidad de radiación de la requerida, este fenómeno se le conoce como “Gases de Efecto Invernadero” (GEI). Las concentraciones por parte de la emisión de GEI, tienen una permanencia de vida que oscila entre los 15 a 150 años dependiendo del compuesto, actualmente por la industria y la mano del hombre, la atmosfera deberá almacenar concentraciones superiores, por uno o dos siglos con referencia a sus valores iniciales, la problemática por la prolongación de permanencia en la atmosfera de los GEI, sumado a que el sistema climático tarda en adaptarse a estas concentraciones por el retardo de temperatura, se le denomina como “Cambio Climático”, generalizándose como el calentamiento global por temperatura y la variabilidad climática en la vida de los seres humanos, naturaleza y las actividades productivas.

Figura 6

Cambio Climático



Nota: Extraído de evaluaciones del IPCC, (1992)



2.2.2.2. Modelos climáticos globales

Los Modelos Climáticos Globales (GCM), se consideran como herramientas primordiales para el estudio de eventos meteorológicos, actualmente son empleados para estudiar el cambio climático y los posibles impactos que generaría sobre una región (Blázquez, 2011). Los MCG, son representaciones matemáticas que representan los procesos físicos del mar, el suelo, la atmosfera y la criósfera, realizando una simulación de cómo estos procesos podrían evolucionar a través de las concentraciones de GEI (Barros, 2004), constituyéndose indispensables para el análisis de clima, por generar simulaciones realistas de variables climáticas, como de patrones de circulación para posibles evoluciones del clima sobre el planeta, debiendo realizar una evaluación exhaustiva antes de su aplicación para estimaciones futuras, debido a las capacidades y limitaciones que posee cada modelo (Casado et al., 2011).

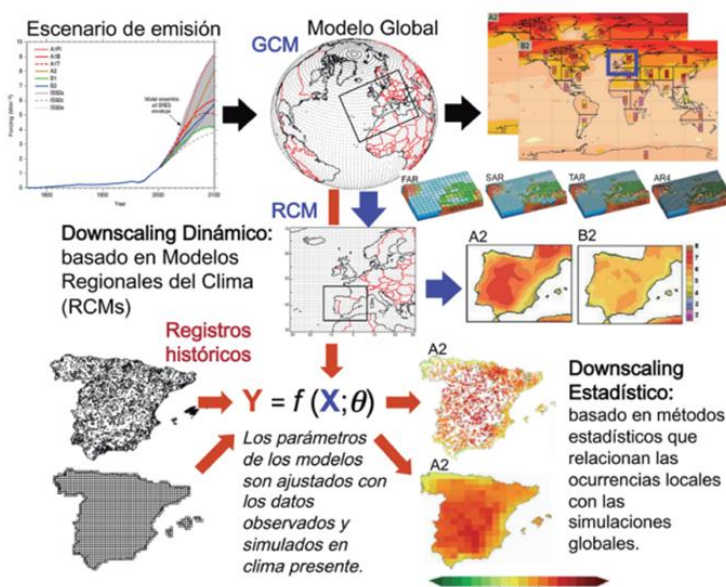
Las predicciones de los modelos climáticos, son diferentes a las predicciones climáticas que se basan en observaciones de las condiciones iniciales realistas del clima, y estas generan información en un futuro cercano, mientras que los MCG, dependen de diversos escenarios de emisiones, y de supuestos relativos, con un pronóstico a largo plazo, aunque aún existan sesgos en las proyecciones, debido a que tienen que incorporar parametrizaciones en la representación de sucesos que no son explícitamente posibles de resolver, haciendo que un modelo puede diferir de otro por las variables utilizadas (Amblar et al., 2017).

a) Regionalización climática

La regionalización permite recolectar información de modelos climáticos de gran escala y extraerla a escalas local y/o regional (de 10 a 100km), estas técnicas se pueden aplicar de manera espacial y temporal, así mismo la regionalización hereda los defectos y debilidades del modelo utilizado, para la mejora de escala se pueden aplicar dos técnicas, una consiste en métodos de regionalización dinámicos que se basan en modelos globales y regionales de alta resolución a pesar de ser consistentes, son también costosos en tiempo de cálculo, por otra parte existe el método de regionalización empírico/estadístico, que relacionan estadísticamente las variables climáticas a gran escala (predictores) con relación a las variables climáticas a escala local/regional (predictandos) (Amblar et al., 2017).

Figure 7

Esquema de regionalización



Nota. Extraído de Gaertner y Castro (2012)



b) Regionalización estadística

Consiste en aplicar una serie de relaciones empíricas y/o estadísticas, entre las variables locales de interés (predictando) y las variables mejor simuladas (predictores) como temperatura o parámetros derivados por modelos climáticos de baja resolución, siendo este método muy atractivo para aplicaciones hidrológicas, estos se encuentran libres de sesgos para el proceso de calibración siendo muy conveniente en los estudios de impacto. La estacionalidad temporal en la relación empírica considerando los factores asociados a variables locales, viene a ser una de sus limitaciones, así como tienden a subestimar la varianza (Amblar et al., 2017).

c) Regionalización dinámica

La regionalización dinámica se basa en las leyes de la física, permitiendo vincular los aspectos físicos y dinámicos, entre un modelo global a procesos de escalas más pequeños, esta suele ser computacionalmente muy compleja y de elevado costo, pero son muy buenas para representar las respuestas por el aumento de concentración en los GEI, según IPCC en su quinto informe, menciona que este tipo de regionalización tiene una gran confianza con la información climática que proporciona para regiones con topografía variable como distintos fenómenos a pequeña escala (Amblar et al., 2017).

2.2.2.3. CMIP5

El CMIP por sus siglas en inglés, corresponden al Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, este proyecto tuvo diferentes



fases en los años anteriores por iniciativa del Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP), cuya finalidad es el análisis del clima en el tiempo, mediante la compresión del clima pasado, presente y las proyecciones futuras con la aplicación de GCM. El CMIP5, es un proyecto que a través de diversas variables produce múltiples modelos en base a un conjunto de datos, para obtener diversos climas bajo el efecto del cambio climático (Bonilla y Mesa, 2017), los componentes que conforman de forma general estos modelos son modelos de complejidad intermedia de tierra, una componente atmosférica y oceánica, y en ocasiones componentes biogeoquímicos, todos ellos fundamentales para el flujo de carbón entre el océano, reservorios terrestres y la atmosfera. Así mismo el CMIP5 realiza diversas corridas de simulación para Rutas Representativas de Control, las cuales son forzamientos por las emisiones y concentraciones específicas en las composiciones atmosféricas, el CMIP5 comprende más de 50 Modelos de Circulación General Acoplados Océano – Atmosfera (AOCGM, por sus siglas en ingles), así como de 20 grupos de modelación (Andrade y Montero, 2019)

2.2.2.4. Escenarios de cambio climático

Un escenario se refiere a proyecciones alternativas que podrían suceder en el futuro, siendo un instrumento útil para el análisis del cambio. Estas proyecciones son influenciadas por fuerzas determinantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico en las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero, lo cual permite la creación de modelos de clima (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático, 2000). De manera similar,



Fernández et al. (2014) describen los escenarios de cambio climático como una representación del clima futuro, “basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico”, y que son empleados para la simulación de impactos. Asimismo, Amador y Alfaro (2009) señalan que los escenarios de cambio climático constituyen un conjunto consistente de relaciones físicas o estadísticas, que diferencian un escenario climático del clima actual o base a escala global, mediante un sistema de ecuaciones dinámicas.

a) Forzamientos radiativos y horizontes de futuro

El IPCC, habla sobre el proceso que altera una parte o en su totalidad del balance energético del sistema climático global, con el término “forzamiento radiativo” o trayectorias representativas de Concentraciones (RCP’s por sus siglas en ingles), expresadas en W/m^2 , que viene a ser la energía solar meda absorbida por metro cuadrado sobre la tierra (Fernández et al., 2014), los RCP, son escenarios a largo plazo que engloban series temporales de emisiones con las concentraciones de GEI, aerosoles y los gases químicamente activos, conjuntamente con el uso de suelo y la cubierta terrestre, cada RCP se asocia a una data espacial de emisiones de contaminantes, concentraciones de los GEI y sobre el uso del suelo, combinadas en diversos modelos que los relacionan sobre la complejidad de la química atmosférica y del ciclo de carbono (Amblar et al., 2017).

Tabla 1

Características de las Trayectorias de Concentración Representativas

(RCP)

RCP	Forzamiento Radiativo total (FR)	Tendencia del FR	Concentración de CO ₂ en 2100
RCP 2.6	2,6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4,5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6,0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8.5	8,5 W/m ²	Cr4eciente	936 pmm

Nota: Se aprecia las características para cada escenario RCP.

- **Escenario RCP 2.5 (de declinación)**

Para el presente escenario se prevé una reducción para las emisiones en los GEI, primeramente, se fuerza a 3.1 W/m² hasta mediados de siglo y de ahí para adelante el forzamiento radiatvo es de 2.6 para el 2100, teniendo una probabilidad que la temperatura no exceda los 2°C (García et al., 2017).

- **Escenario RCP 4.5 (de estabilización)**

Este escenario RCP 4.5 simula un comportamiento de concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, mediante un forzamiento radiativo de 4.5 W/m², para el 2100, considerándose un escenario intermedio, cuya característica se considera una población mundial que llega a su máximo valor a mediados de siglo, posteriormente tiende a descender, y según el IPCC, 2007 para este escenario, tanto el crecimiento económico apoya a una sostenibilidad económica, social y ambiental. (Marín, 2023).

- **Escenario RCP 6.0 (de estabilización)**

En este escenario se espera que el forzamiento radiativo se estabilice en un corto plazo después del año 2100, y la temperatura no exceda los 2°C.

- **Escenario RCP 8.5**

Este escenario describe una trayectoria con un alto grado de concentración de GEI, forzando en su totalidad la radiación para el año 2100, donde se considera el máximo crecimiento poblacional para mediados del siglo, con un uso intensivo de combustibles fósiles (Marín, 2023).

2.2.2.5. Método de reducción de escala

Un escenario se refiere a proyecciones alternativas que podrían suceder en el futuro, siendo un instrumento útil para el análisis del cambio. Estas proyecciones son influenciadas por fuerzas determinantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico

Para las predicciones de escenarios climáticos regionales, generalmente se utilizan las derivaciones de modelos globales, realizando procedimientos de tipo físico dinámico, estadístico o mixto (híbrido), transfiriéndose la información global para una proyección a escala espacio temporal requerida (Amador y Alfaro, 2009). Las proyecciones de los modelos climáticos globales son de una resolución de 0.2° a 4° (lat x lon) que equivale a 200 m x 400 km, en donde los RCP no son de alta resolución, para lo cual se requiere técnicas de reducción de escala ya sean



dinámicas o estadísticas, para emplearlos en estudios regionales, la cobertura de las técnicas dinámicas, son menores a las globales a pesar de usar modelos de mayor resolución espacial, siendo restringidas las condiciones de frontera a través de los AOCCGM, mientras que las técnicas estadísticas, usan relaciones estadísticas entre componentes de mayor y menor escala de variables climáticas para las proyecciones (Andrade et al., 2019).

a) Métodos Dinámicos

Los métodos dinámicos o físicos, emplean un modelo de alta resolución en un área específica, denominándose Modelo Climático Regional (MCR) a partir de condiciones de frontera de los Modelos Atmosféricos de Circulación General Acoplados (MACGA), existiendo un proceso de anidamiento donde los MRC están inmersos en los modelos globales según Amador y Alfaro (2009), así mismo Garcés (2022), menciona que estos métodos requieren grandes capacidades de cómputo para el modelamiento de variables con resoluciones más detalladas.

b) Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos se realizan a través de relaciones estadísticas, entre datos observados y las variables de interés de los modelos globales (Garcés, 2022). Al igual que los métodos dinámicos, los estadísticos usan los modelos de circulación general, obteniéndose a partir de relaciones empíricas entre predictores que son parámetros derivados de los MCG y los predictantes locales (Amador y Alfaro, 2009)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio denominado subcuenca del río Putina, cuya extensión cuenta con aproximadamente 1840.81 km², fue delimitada como punto de aforo en la ciudad de Putina, centrándose en las urbanizaciones aledañas a ambos márgenes del río Putina, este mismo tiene su flujo por medio de la ciudad, y se encuentra ubicada en la región natural Sierra, departamento de Puno, provincia de San Antonio de Putina, distrito de Putina. Cuyas coordenadas UTM es 8350905.00 Norte, 406756.00 Sur y a una altitud de 3878 msnm.

Así mismo el área de trabajo abarca varios distritos como se muestra a continuación:

Tabla 2

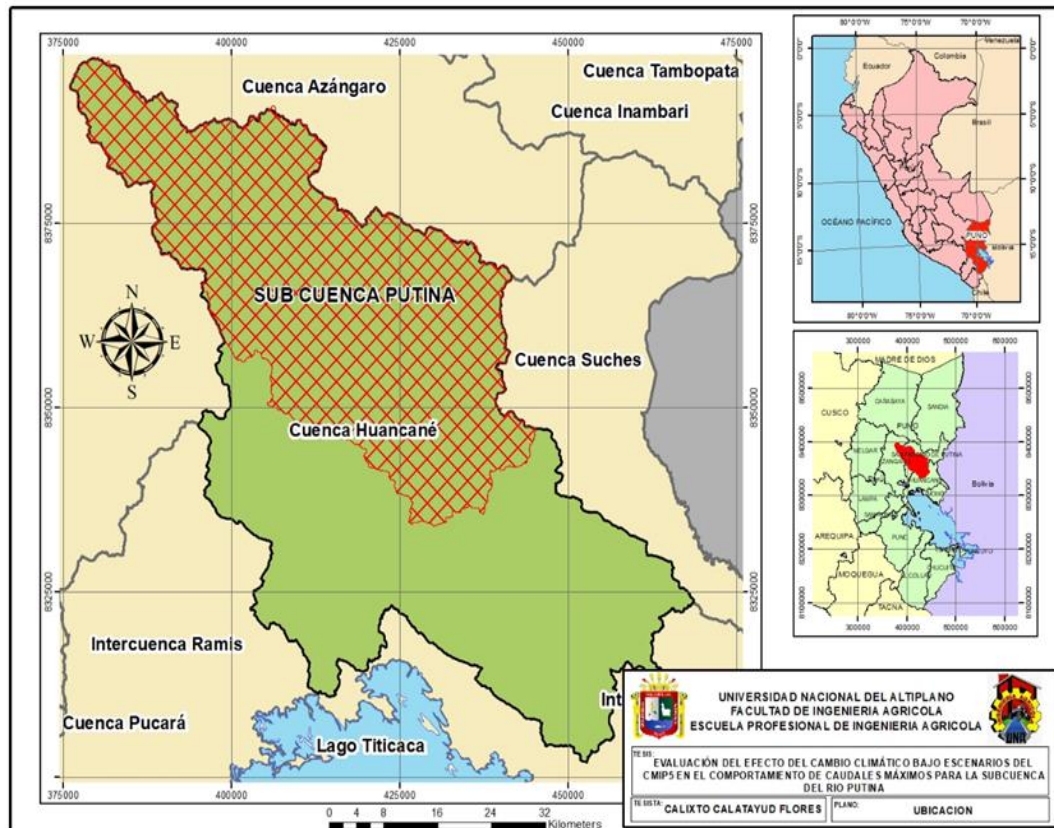
Área de la cuenca por distritos

Región	Provincia	Distrito	Área (km ²)
Puno	San Antonio de Putina	Quilcapuncu	510.928
		Ananea	102.862
		Putina	441.662
	Azángaro	Muñani	623.414
		Potoni	1.869
		San jose	0.169
		San anton	0.023
	Huancané	Inchupalla	157.497
		Cojata	2.255
		Huatasani	0.088
		Vilque chico	0.042

Nota: Se muestra el área de influencia de la sub-cuenca por distritos a nivel de ubicación política y geográfica (obtenido con Arcgis).

Figura 8

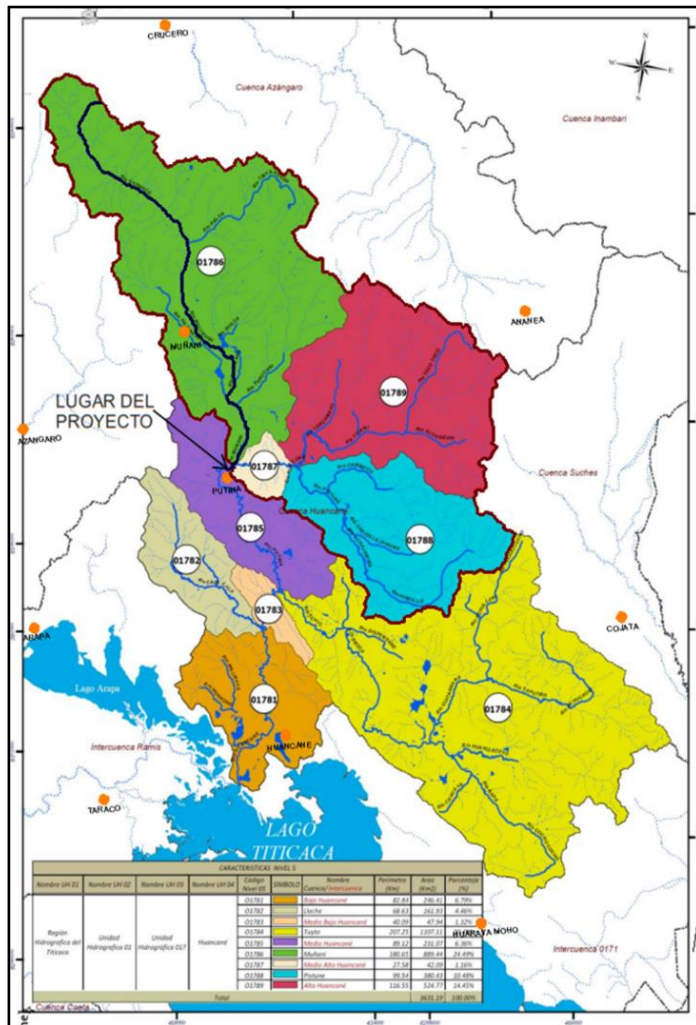
Ubicación del área de estudio



De la figura 9, se observa la subcuenca del río Putina en franjas rojas, dentro de la cuenca Huancané en área verde, que de acuerdo al estudio hidrológico realizado en las cuencas Huancané y Suches de la Autoridad Nacional del Agua (2010), el tramo a estudiar del río Putina, se encuentra en la subcuenca medio Huancané (UH01785), que recibe el aporte de las subcuencas, Muñani (UH 01786), Medio Alto Huancané (UH01787), Pistune (UH 01788) y Alto Huancané (UH 01789).

Figura 9

Unidades Hidrográficas de la Cuenca Huancané.



Nota: La Sub-cuenca del río Putina se visualiza con una línea color granate (extraído y adaptado de la Autoridad Nacional del Agua).

Tabla 3*Sistema fluvial para la Sub-Cuenca Putina*

Nombre	Código	Nombre del río	Longitud del río (km)	Integrado por
Sub cuenca Muñani	Cuenca (01786)	Río Muñani	71.58	Río Huancollo, río Guanaco, río Mallquini, río Muñani
Sub cuenca Medio Alto Huancané	Cuenca (01787)	Río Pongongoni	16.17	Río Pongongoni
Sub cuenca Pistune	Cuenca (01788)	Río Pistune	52.53	Río Machaypunco, río Humullo, río Achajahuirra, río Pistune
Sub cuenca Alto Huancané	Cuenca (01789)	Río Puncune	49.34	Río Toco Toco, río Ticani, río Puncune

Nota: Descripción del esquema fluvial de los afluentes al río Putina

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación descrita es de tipo empírica, ya que se basa en datos y observaciones reales para responder a una pregunta de investigación. Además, la investigación es de tipo correlacional, ya que busca establecer la relación entre la precipitación y los caudales máximos en una subcuenca hidrográfica.

En cuanto a las características de la investigación, se puede clasificar como descriptiva, ya que busca describir el comportamiento de los caudales máximos en relación con los cambios en la precipitación. También se puede considerar como exploratoria, al buscar analizar un tema poco explorado y que puede generar nuevas preguntas de investigación.

La investigación requerirá el uso de modelos climáticos e hidrológicos para simular los efectos del cambio climático en la subcuenca hidrográfica, lo que la hace una investigación cuantitativa. También se espera que la investigación tenga un enfoque interdisciplinario, ya que requiere la integración de conocimientos y técnicas de diferentes disciplinas, como la climatología, la hidrología y la modelización matemática.



- Tipo: Aplicada, la presente investigación aplica conocimientos de ciencias en la práctica.
- Enfoque: Cuantitativo, los conocimientos aplicados traerán como resultados magnitudes numéricas, y las variables se cuantifican.
- Alcance o Nivel: Descriptiva, debido a que se evaluarán los resultados, describiéndose y/o estudiando en un contexto espacio - temporal.
- Diseño: No Experimental, puesto que trabaja con datos de forma natural, sin manipular las variables, solo se cuantifican.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

a) Técnicas

Las principales técnicas para recolectar información, para emplearlas en la presente investigación es la observación; y otra técnica es la revisión bibliográfica de tesis, artículos científicos, libros, páginas webs, entre otros.

b) Instrumentos

Los instrumentos empleados dentro del estudio fueron el uso de programas como Microsoft office 2016, Autocad civil 3d 2019, ArcGIS 10.5, Global Mapper 18, Google Earth Engine, RStudio 4.2.3, Hec Hms 4.10 y CMhyd

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

La población definida abarca todos los eventos de precipitación y caudales, tanto históricos como proyectados, que impactan la subcuenca del río Putina. Esto



permite comprender la hidrología pasada y futura de la cuenca, brindando una visión completa de cómo el cambio climático podría afectar los caudales extremos.

3.4.2. Muestra

La muestra, por otro lado, es un subconjunto representativo de la población que se selecciona para realizar el análisis. En este caso, la muestra se centró en el análisis de datos históricos de precipitación y caudales máximos entre 1970 y 2022 (52 años) para estudiar el comportamiento pasado de la subcuenca del río Putina.

Estaciones meteorológicas seleccionadas donde se utilizaron datos de 6 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la subcuenca y sus alrededores para generar las proyecciones y validar los modelos.

Los Modelos climáticos seleccionados donde se seleccionaron 18 GCM del proyecto CMIP5 para realizar las proyecciones

3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

El procedimiento metodológico en el sentido de lograr los objetivos planteados en este estudio: toda la información se recogió de las tesis, libros, publicaciones académicas y sitios web, entre otras fuentes.

3.5.1. Recopilación de información

Por otra parte, la información utilizada se detalla a continuación:

- a) Datos cartográficos: Con respecto a la información cartográfica se utilizó las cartas nacionales del Instituto Geográfico Peruano (IGN), a una escala 1:100000, con las hojas 29-V, 29-X, 29-Y, 30-V, 30-X, 30-Y y 31-X, en el



datum WGS84, zona 19 sur, así como también se utilizó, imágenes satelitales de Google Earth y modelo digital de elevación, elaborados por el radiómetro Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection (ASTER), de la alianza de la NAZA y ministerios de Japón.

- b) Información meteorológica observada: Para la información meteorológica se realizó el polígono de Thiessen, determinando las estaciones con influencia en la cuenca, una vez identificado las estaciones se solicitó los datos meteorológicos históricos al SENAMHI, quien nos brindó la información de las 7 estaciones inmersas en la subcuenca, con datos de precipitación diaria entre 1970 – 2022, como se muestra en la tabla 4. Así mismo se utilizó la información de precipitación de los datos interpolados del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI'S Climatological and Hydrological Observations).
- c) Información meteorológica proyectada: Los datos de los GCM del CMIP5 a través de diferentes fuentes, están disponibles en los sitios web oficiales, para esta ocasión se usó datos diarios de precipitación proyectados e históricos de los GCM, de la plataforma de NASA Center for Climate Simulation, del World Climate Research Program (WCRP), y datos mensuales del portal de Climate Explorer.
- d) Información hidrométrica: La sub cuenca en estudio no cuenta con datos hidrométricos, y siendo este un afluente de la cuenca Huancané, y para fines de verificación se recolecto la información hidrométrica del Río Huancané proporcionados por el SENAMHI, entre el periodo de 1970 al 2022.

Figura 10

Polígono de Thiessen en la subcuenca del río Putina

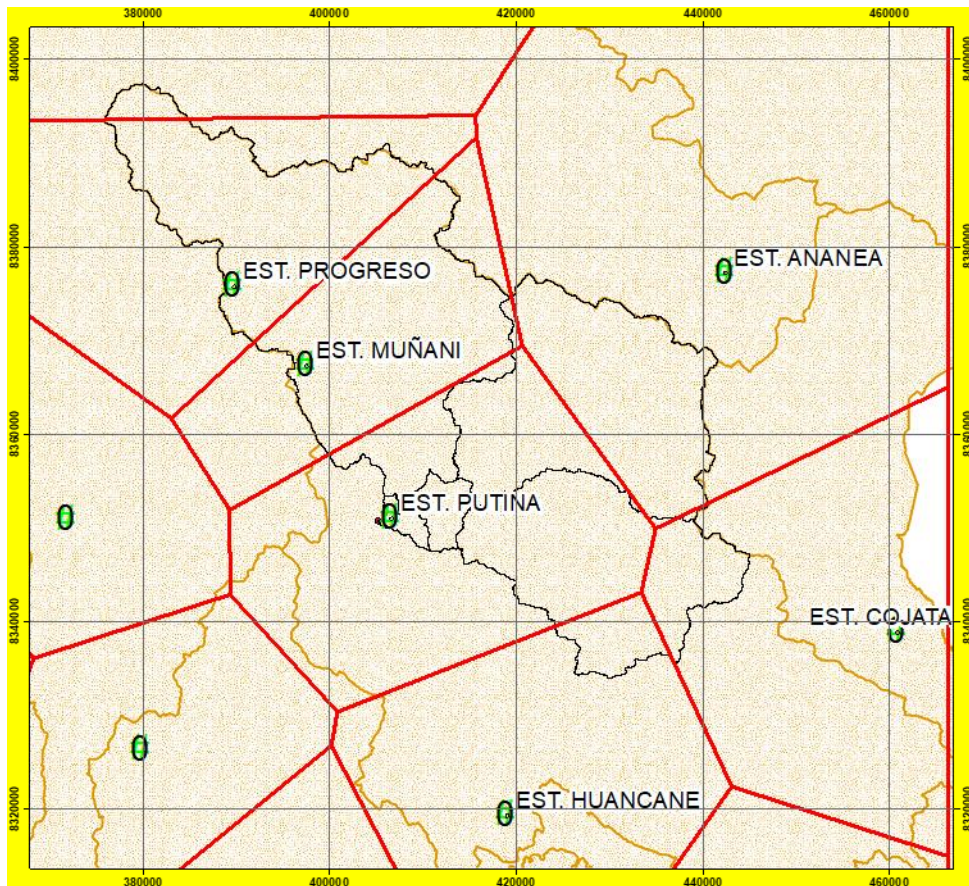


Tabla 4

Estaciones meteorológicas para el área de estudio

ESTACION	CODIGO	Ubicación Política		Ubicación geográfica			PERIODO	
		DISTRITO	PROVINCIA	DPTO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	
CRUCERO	007415	Crucero	Carabaya	Puno	14°21'51.1"	70°01'33.3"	4128	1970-2022
C.P.PROGRESO	000778	Asillo	Azangaro	Puno	14°41'24.4"	70°01'24.7"	3925	1970-2022
MUÑANI	000785	Muñani	Azangaro	Puno	14°46'01"	69°57'06.5"	3932	1970-2022
ANANEA	000826	Ananea	S.A.Putina	Puno	14°40'42.4"	69°32'03.3"	4660	1970-2022
PUTINA	157414	Putina	S.A.Putina	Puno	14°54'52.6"	69°52'03.9"	3878	1970-2022
HUANCANE	000786	Huancane	Huancane	Puno	15°12'05.4"	69°45'12.8"	3890	1970-2022
COJATA	000827	Cojata	Huancane	Puno	15°01'31.5"	69°21'49.3"	4380	1970-2022

Nota: Los datos fueron adquiridos del SENAMHI



3.5.2. Analizar la situación actual de los caudales máximos de la subcuenca Putina, en relación con la precipitación, utilizando datos históricos observados.

La metodología y procedimiento, para este primer objetivo, consiste en generar los caudales máximos, a través de datos de precipitación observada (histórica), mediante el tratamiento de información meteorológica, procesamiento de la cuenca y el modelamiento hidrológico.

En el contexto de esta investigación, se ha empleado como punto de referencia el estudio Hidrológico de las cuencas Huancané y Suches (ANA, 2010), donde se evaluó los recursos hídricos de dichas cuencas, con información de estaciones meteorológicas e hidrométricas a lo largo de un extenso período, desde 1956 hasta 2009 (53 años). Mientras que para nuestra investigación se centró en la subcuenca Putina, un tributario crucial de la cuenca Huancané. En esta investigación, nos enfocamos en extender y actualizar dicho análisis, en un periodo de estudio desde 1970 hasta 2022, también con una duración de 53 años. Este enfoque temporal más actualizado nos permite evaluar con mayor precisión la relación entre los caudales máximos y los datos de precipitación, estableciendo así una conexión más robusta entre las variables meteorológicas a lo largo del tiempo.

3.5.2.1. Procesamiento de la cuenca

La delimitación de la cuenca fue determinada con HEC-GeoHMS, en un proceso que se lleva a cabo utilizando un conjunto de herramientas y funciones proporcionadas por el software HEC-GeoHMS, que es una extensión de ArcGIS desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército



de los Estados Unidos (USACE). HEC-GeoHMS se utiliza comúnmente para la modelización hidrológica y la gestión de recursos hídricos en cuencas fluviales (Larios et al., 2015). Para la delimitación de las unidades hidrográficas de la subcuenca Putina, se utilizó los datos geoespaciales necesarios, disponibles en formato del entorno de trabajo de ArcGIS, la delimitación se realizó en un punto ubicado en las coordenadas 405227.00 y 8350744.00, además, se empleó la información proporcionada por la ANA, la cual aplicó la metodología de Pfafstetter. Esta metodología fue aprobada en el año 2008 a través de la Resolución Ministerial N° 033-2008-AG, con el propósito de delimitar y codificar las unidades hidrográficas de Perú. (ANA, 2010), por lo tanto, se generaron 05 unidades hidrográficas realizando algunos ajustes considerando la topografía y la desembocadura de nuestra cuenca, de las cuales 3 se asimilan como parte de la unidad hidrográfica de la cuenca Huancané, según el estudio de la ANA, como se indica en la tabla de Sistema fluvial para la Sub-Cuenca Putina (tabla 03).

a) Determinación de parámetros morfométricos

- **Área y perímetro de la cuenca:**

Este análisis se realiza utilizando un modelo de elevación digital (DEM) que representa la superficie terrestre en un conjunto de celdas o píxeles, donde una vez identificado el punto de drenaje, se utiliza el algoritmo de acumulación de flujo, que calcula la cantidad de agua que fluye hacia cada celda, para luego utilizar otro algoritmo de delineación de cuenca para definir el límite de la cuenca que drena hacia la fuente

seleccionada y finalmente, calcular el área de la cuenca utilizando el algoritmo de estadísticas de zona para determinar la suma de los valores de las celdas dentro del límite de la cuenca.

Tabla 5

Área y perímetro de la sub cuenca

Nombre	Perímetro (km)	Área (km ²)
Sub cuenca del río Putina	279.76	1840.81

- **Índice de compacidad (K_c):**

El índice de compacidad se determinó utilizando los valores de área y perímetro, este índice se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca, basado en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual a la de la cuenca (círculo equivalente); de esta manera, entre mayor sea el coeficiente más distante será la forma de la cuenca con respecto del círculo. (Reyes, 2010) Esta se define con la siguiente ecuación:

$$K_C = 0.282 * \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Donde:

K_c: Índice de la compacidad o índice de Gravelius (Adimensional).

P: Perímetro de la cuenca (km).

A: Área de la cuenca (km²).

Donde se obtuvo un valor de 0.024 para el índice de Gravelius indica que la cuenca tiene una forma alargada y estrecha en lugar de ser compacta.

- **Factor de forma (F):**

Para el factor de forma se empleará la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (L_m). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según su comportamiento, si tiende hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca. Un valor de (F) superior a la unidad dará el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. (Reyes, 2010), esta se define mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{A}{L_m^2}$$

Donde:

F: Factor de Forma (adimensional).

A: Área de la cuenca (km^2).

L_m : Longitud de máximo recorrido (km).

Nuestro factor de forma adquirida para nuestra cuenca, obtuvo un valor de 0.117, esto sugiere que la cuenca tiene una forma alargada.

- **Tiempo de concentración (T_c):**

El tiempo de concentración (T_c) en hidrología se refiere al tiempo que tarda una gota de agua desde el punto más alejado de una cuenca hidrográfica en llegar al punto de interés, como una salida de aguas pluviales o un punto de salida de una cuenca. La fórmula aplicada fue la de Kirpich es una de las muchas utilizadas para estimar este tiempo de concentración. La fórmula de Kirpich se expresa de la siguiente manera:

$$T_c = 0.000325 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Es importante destacar que la fórmula de Kirpich es una estimación y se basa en observaciones empíricas, donde L es la longitud de la cuenca y S la pendiente promedio.

- **Tiempo de Retardo (T_{lag}):**

El tiempo de retardo, en el contexto hidrológico, se refiere al intervalo de tiempo que transcurre desde que comienza la lluvia hasta que el pico del caudal máximo llega al punto de interés dentro de una cuenca hidrográfica. Este concepto es esencial para entender y modelar el comportamiento temporal de los flujos de agua en respuesta a eventos de lluvia, y se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$T_{lag} = 0.6 * T_c$$

b) Determinación del número de curva

La determinación del número de curva, se realizó mediante la aplicación del método de del SCS, en la plataforma Arcgis, dándole como entrada 3 archivos fundamentales que consistieron en:

- Modelo digital de elevación
- Tipo hidrológico de suelo o cobertura vegetal
- Uso de suelo

Figura 11

Archivos de entrada para el Número de Curva



Nota. En la figura se aprecia en el extremo izquierdo el mapa de uso de suelos, la del medio se tiene el mapa de cobertura vegetal y por extremo derecho se encuentra el DEM o mapa de elevación.

Cabe indicar que la metodología del SCS para el Numero de curva, busca crear una relación entre la precipitación (P) y el escurrimiento directo (Q), la hipótesis de este método consiste en que conforme la intensidad de precipitación sea mayor, el suelo se saturada en un menor tiempo posible por lo tanto lo que precipitará se volverá en escurrimiento ($Q=P$) (Paz, 2009), para lo cual se estableció la siguiente relación empírica:



$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)}, P \geq Ia$$

Donde,

Ia : esta expresado en mm y viene a ser la abstracción inicial por intercepción de la vegetación, almacenamientos superficiales, evapotranspiración y entre otros factores

S: es el parámetro de retención expresada en mm, esta varia por el tipo y uso del suelo, manejo y pendiente.

El parámetro *Ia* puede expresarse en función de *S*, de la siguiente manera:

$$Ia = kS$$

De donde *k*, según SCS, 1972 y el NRCS, 2004, generalmente adopta un valor de 0.2, y *S* es estimado como:

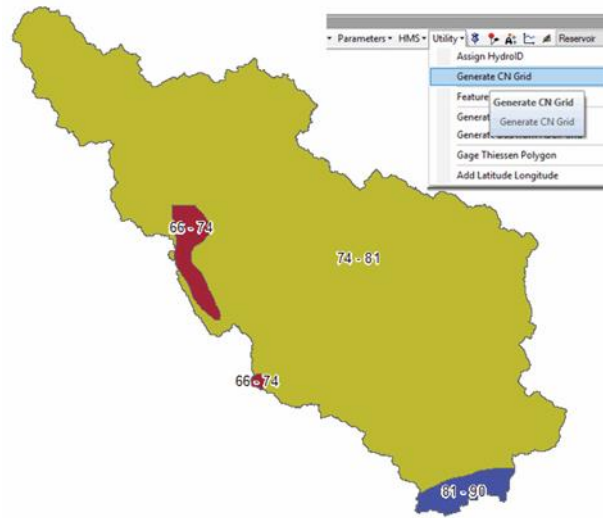
$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right)$$

Donde, *NC* es adimensional entre 0 a 100, en función principalmente de la humedad antecedente, pendiente, manejo y uso del suelo

Con estas denotaciones mediante el ARCGIS se introdujeron los mapas temáticos, interceptando los shapfiles de uso y tipo de suelos para luego rellenar valores en las tablas de atributos y mediante la herramienta “Utility” del HEC-GeoHMS se generó el raster del número de curva, guardando un archivo con la salida de “CNgrid”

Figura 12

Numero curva para la sub cuenca



Finalmente, como se cuenta con polígonos de área con diferentes números de curva, para nuestro número de curva general, se realizó el sumatorio de todos los números de curvas entre su área de influencia:

$$CN = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i}$$

Con esta última ecuación es como se determinó el número de curva general para cada unidad hidrológica, tomando valores de 71 a 77, para el presente proyecto se usará ese rango para calibrar el modelo hidrológico.

3.5.2.2. Tratamiento de información Meteorológica

a) Análisis estadístico de datos

La aplicación del análisis estadístico permite que los datos en el estudio hidrológico sean consistentes, como indica Villón (2002). En este sentido, la información disponible debe ser confiable y tener una cantidad suficiente. Para ello, se realizaron procesos de análisis de consistencia de



la información, completación de datos faltantes y extensión de registros. En nuestro caso, mediante la delimitación de la cuenca, se aplicó el polígono de Thiessen para determinar las estaciones que influyen en el área de estudio, recopilándose información meteorológica de siete estaciones. Asimismo, se realizó el análisis estadístico conforme a las recomendaciones de la Autoridad Nacional del Agua, sometiendo los datos sin tratar a la siguiente secuencia de trabajo:

- **Análisis exploratorio de Datos**

Con la información diaria sin tratar, se procedió a calcular las estadísticas descriptivas básicas, como la media, la mediana, la desviación estándar, el rango, los percentiles y entre otros, proporcionándonos una comprensión inicial de la tendencia central, la dispersión y la forma de la distribución de los datos.

- **Completación de datos faltantes**

Para la completación de datos diarios se empleó el “paquete R Climatol”, que según las referencias de Mejia et al., (2022), es un método importante para obtener datos adecuados y completos siendo versátil, así mismo R Climatol, es una herramienta de análisis climático en lenguaje de programación R, que dentro de sus funciones permite realizar el control de calidad, el relleno de datos faltantes y el proceso de homogeneización de diferentes series climáticas a escala diaria y mensual. Realizándose los siguientes pasos



El primer paso consistió en generar 2 archivos de entrada con la función “daily2climatol”, el primer archivo con datos de las estaciones en un formato denominado “pp_1970-2022.est”, que contiene la lista de coordenadas en longitud como latitud, elevación, código y nombre de las estaciones, el segundo archivo tiene el formato y denominación “pp_1970-2022.dat”, que almacena los datos de precipitación diaria en orden cronológico desde la primera estación hasta la última, donde los datos ausentes van con denominaciones de NA ó -999.

El segundo paso fue realizar un análisis exploratorio con la función “homogen” de climatol, este hace el análisis exploratorio diario, para conocer el estado de los datos iniciales, según Guijarro (2019), menciona que la metodología adoptada por el paquete es la del método de Paulhus y Kohler (1952), donde se realiza el promedio de valores próximos a las precipitaciones diarias faltantes, con la división de sus precipitaciones medias respectivas, así mismo Climatol también lo realiza mediante las restas de medias o una estandarización completa, a continuación, se presenta las opciones que emplea para su normalización:

- Restar la media: $x = X - m_x$
- Dividir por la media: $x = \frac{X}{m_x}$
- Estandarizar: $x = (X - m_x)/s_x$

donde:

m_x : es la media

s_x : es la desviación estándar

X : es una Serie

Dado que las series presentan datos faltantes y la metodología se basa en medias y desviaciones estándar, el paquete realiza, en una primera etapa, el cálculo de estos parámetros con los datos disponibles de cada serie. Luego, procede a llenar los datos faltantes inicialmente. Posteriormente, recalcula las medias y desviaciones estándar usando los datos completados en la primera etapa, reemplazando nuevamente los datos ausentes iniciales con los nuevos parámetros de la segunda corrida. Este procedimiento se repite sucesivamente hasta que las medias se estabilizan. Una vez logrado esto, los datos se normalizan y se estiman utilizando la siguiente expresión:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Donde;

\hat{y} : viene a ser un valor estimado de los n datos x_j más cercanos disponibles en paso temporal

w_j : es el peso asignado a cada uno de ellos.

Una vez realizado el análisis exploratorio diario, se procedió a convertir los datos diarios a datos mensuales con los archivos de salida de la primera función “homogen”, los resultados de esos datos se convertirán a datos mensuales mediante la función “dd2m”, debido a que las homogenizaciones a nivel diario presentan grandes variabilidades, los cuales



no son eficientes, por lo cual se homogeneiza a nivel mensual, y se vuelve a realizar el análisis exploratorio mensual con la función “homogen”.

Para las series observadas, se tomarán como referencia las series estimadas para obtener series de anomalías. A estas se les aplicará un análisis de outliers, eliminando los datos con valores superiores al umbral de desviación estándar previamente fijado. Luego, mediante el Estándar Normal Homogeneity Test (SNHT) de Alexandersson (1986), se detectarán y eliminarán las inhomogeneidades en las series de anomalías, realizando un control de calidad y ajustando los valores lo más posible a la realidad (Alberdi et al., 2022). Cuando los valores del SNHT superan un umbral definido, Azorín et al. (2016) indican que las series deben dividirse sucesivamente en el punto de ruptura del valor máximo del SNHT, creando una nueva serie con los datos excedentes. Esta nueva serie mantendrá las mismas características, pero con un sufijo numérico añadido al código y nombre de la estación, realizándose así un proceso iterativo hasta que ningún valor del SNHT supere el umbral establecido. En una primera etapa, esta prueba identifica puntos de ruptura en la serie; para la detección de más de dos saltos, se realiza una segunda aplicación del SNHT a las series completas y, en la tercera pasada, se rellenan los datos ausentes en todas las series y subseries (Guijarro, 2019).

Posteriormente al ajuste mensual, se procede a realizar el ajuste diario con la función “homogen” y cargando los resultados de la homogeneización mediante la función “load”, para esta etapa Alberdi et al. (2022), indican que, del proceso anterior, se emplean los puntos de

ruptura de los sub-periodos homogéneos mensuales para realizar la reconstrucción de todas las series diarias

Por último, con la función “view” se puede apreciar todos los resúmenes estadísticos, y con la función “dashtat” se obtiene un archivo de salida con una relación de las correcciones completadas y homogenizadas con sus niveles de los SNHT y el Error cuadrático. Generando de manera automática ficheros y esquemas de las series rellenadas y homogeneidades según se requiera (Mejía et al., 2022).

- **Análisis de consistencia**

Con los datos completados se inició con el análisis de consistencia mediante las representaciones gráficas de las series temporales, de acuerdo a (Smith et al., 2000), donde los datos observados muestran su variabilidad a lo largo del tiempo y suelen proporcionar información rápida y valiosa para investigar la presencia de cambios o tendencias en la serie temporal. El análisis de consistencia partió del supuesto de que los datos dados son estacionarios en términos de su promedio y covarianza, no obstante, si se observan cambios o tendencias en los datos, esta suposición de estacionariedad resulta inválida.

- **Consistencia en la media:**

Para el análisis estadístico, se utilizó la prueba t (prueba de hipótesis) para determinar si los valores promedio \bar{x}_1 , \bar{x}_2 de las submuestras son estadísticamente equivalentes o distintos, con un nivel de

probabilidad del 95% o una significancia del 5%. (Villón, 2006). Para lo cual se tiene:

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_\theta}$$

Donde:

t_c : es el t calculado

\bar{x}_1, \bar{x}_2 : Es la media de los periodos 1 y 2 de la serie de tiempo

S_θ : Es la desviación de las diferencias de los promedios

Si estadísticamente, $|t_c| \leq t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2$; no se debe realizar la corrección

Si estadísticamente, $|t_c| > t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$; se requiere realizar la corrección

Donde el t_t , es el t tabular, que se puede obtener de la tabla t de student.

- **Consistencia en la desviación estándar**

Si la desviación estándar es consistente, los valores de los datos tienden a estar agrupados cerca de la media y muestran poca variabilidad.

Por otro lado, si la desviación estándar es inconsistente, los valores de los datos se dispersan ampliamente alrededor de la media y muestran una mayor variabilidad. (Villón, 2006).

Para ello el análisis se realizará mediante la prueba F, con 5% de nivel de significancia o 95 % de probabilidad.



Si estadísticamente, $|F_c| \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x)$; no existe una diferencia significativa

Si estadísticamente, $|F_c| > F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x)$; se requiere realizar la corrección

- **Análisis de estacionalidad**

Por último, se realizó la prueba de estacionalidad, el concepto de estacionalidad que nos da Dahmen y Hall (1990), implica que los datos no deben mostrar tendencias durante el período de observación. En el caso de una serie de tiempo de datos hidrológicos, se considera estrictamente estacionaria solo si sus características estadísticas, como la media, la varianza y los momentos de orden superior, no se ven afectadas por la elección del punto de inicio de la serie de datos. En otras palabras, la estacionariedad implica que las propiedades estadísticas de la serie de tiempo permanecen constantes en el tiempo, independientemente de dónde se inicie el análisis.

Para un análisis más completo, se realizó las pruebas estadísticas de la información completada, mediante el uso de la plataforma ANDREA del SENAMHI, con las pruebas correspondientes para ver si los datos son consistentes y pasar a la siguiente etapa.

3.5.2.3. Modelamiento hidrológico

a) Análisis de la función de distribución de probabilidad

Una vez teniendo la información de las series históricas con datos completados y consistentes se extrajo los valores máximos, y con ellos se



hizo una prueba preliminar de datos dudosos a todas las series de precipitación máxima en 24 horas, para cada una de las 7 estaciones, realizando el uso de Funciones de Distribución de Probabilidad, estas funciones harán que la magnitud de los eventos extremos se relacione con su frecuencia de ocurrencia, para así estimar eventos extremos a un periodo de retorno.

El análisis de frecuencia asocia la magnitud de eventos extremos en relación inversa con su frecuencia de ocurrencia a través de distribuciones de probabilidad, en tal sentido los sistemas hidrológicos tienden a ser influenciados por eventos extremos, para lo cual el análisis de frecuencia es de uso diversos en la ingeniería para el estudio de flujos crecientes donde la data hidrológica debe satisfacer las suposiciones de distribución idéntica y de independencia (Chow et al., 1994).

Para aplicar el análisis de frecuencia, se utilizaron el método gráfico, asignando probabilidades según Weibull, y el método analítico, ajustando las funciones de distribución de probabilidad para extrapolar las precipitaciones máximas a distintos periodos de retorno mediante los métodos de momentos y de máxima verosimilitud. La metodología para las distribuciones empleadas se desarrolló siguiendo las fórmulas específicas para cada distribución.

- **Distribución Normal o gaussiana**

Se dice que si una secuencia de variables aleatorias X_i , cumple con ser una distribución idéntica e independiente con una media μ y una varianza σ^2 , la suma de sus n variables aleatorias tiende hacia la

distribución normal (Chow et al., 1994), así mismo, Gutiérrez (2014) menciona que la distribución normal es conocida como Campana de Gauss por ser una distribución simétrica en forma de campana.

La función densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \text{para } -\infty < x < \infty$$

Y según, Villón (2006), la función acumulada es la integral de la función densidad

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} d(x)$$

Donde:

$f(x)$ = Función densidad normal de la variable x

x = Variable independiente

μ = Parámetro de localización igual a la media aritmética de x

σ = Parámetro de escala. Igual a la desviación estándar de x

$F(x)$ = Función de distribución acumulada, para la variable original x

Para la estimación de parámetros de la distribución, se puede usar el método de momentos y máxima verosimilitud (Villón, 2006), obteniéndose lo siguiente:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$



$$s = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{1/2}$$

donde:

\bar{x} = es el estimado de la media, llamado también parámetro de posición.

s = es el estimado insesgado de la desviación estándar o parámetro de escala.

Para el cálculo de la inversa de la distribución Villón (2006), nos dice que para tener un error menor que 4.5×10^4 , para una aproximación del cálculo de la inversa de la distribución gaussiana o normal, se obtiene a través de las siguientes ecuaciones:

$$K_T = Z = w - \frac{c_0 + c_1 * w + c_2 * w^2}{1 + d_1 * w + d_2 * w^2 + d_3 * w^3}$$

$$w = \left[\ln \left(\frac{1}{FZ^2} \right) \right]^{1/2}$$

Donde:

FZ : Es la función acumulada de la distribución normal estándar.

Z : Es la ordenada inversa de la distribución normal estándar.

$c_0 = 2.515517$; $c_1 = 0.802853$; $c_3 = 0.010328$

$d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$

Precipitación máxima probable:

$$X = \bar{X} + K_T S$$

- **Distribución Log Normal de dos parámetros**

Si de una variable aleatoria, sus logaritmos se distribuyen normalmente, se entiende que la variable se distribuye normalmente. Es una distribución muy usada para el cálculo de valores extremos, y la limitación que presenta es que los logaritmos de las variables van centrados en la media (Gutiérrez, 2014)

La función densidad se presenta de la siguiente manera

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu_\gamma)^2}{2\sigma_\gamma^2}}, y = \ln x, x > \infty$$

Donde:

μ_γ = La media de los logaritmos de la población (parámetro escalar), estimado $\bar{\gamma}$

σ_γ = La desviación estándar de los logaritmos de la población, estimado S_y

En cuanto a la función acumulada es la integral de la función densidad de log-normal de 2 parámetros (Villón, 2006), es decir:

$$F(x) = \frac{1}{x\sigma_\gamma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_\gamma}{\sigma_\gamma}\right)^2} dx$$

Para la estimación de los parámetros μ_γ y σ_γ^2 , por el método de máxima verosimilitud, se obtiene con las siguientes relaciones:

La media



$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

La desviación estándar

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_y)^2$$

Factor de frecuencia, Se trabaja con la media y desviación estándar de los logaritmos:

$$\ln[X_{Tr}] = X_y + KS_y$$

De donde

$$X_{Tr} = e^{\ln(X_{Tr})}$$

Donde:

K: Variable normal estandarizada para Tr.

X_y : Media de los logaritmos.

S_y : Es la desviación estándar de los logaritmos.

- **Distribución Gumbel o extrema tipo I**

Trabaja con la media y la desviación estándar, y es una de las distribuciones más usadas para el cálculo de valores extremos, asume un valor constante de sesgo igual a 1.14 (Gutiérrez, 2014). A la distribución Gumbel también se le conoce como Valor Extremo Tipo I, o de doble exponencial (Villón, 2006)

La función de densidad se obtiene derivando la función acumulada

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[\left(-\frac{x-\mu}{\alpha} \right) - \exp \left(-\frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right]$$

En donde α y μ son los parámetros de distribución, y la función de distribución acumulada está dada por:

$$F(x) = \int f(x) dx = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right]$$

Para la estimación de parámetros, utilizando el método de momentos con relaciones de moda y media (Villón, 2006), se obtiene lo siguiente:

Parámetro de escala (α)

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$$

Parámetro de posición (μ)

$$\mu = \bar{x} - 0.57721566490153286061 \alpha$$

Donde \bar{x} y s son la media y la desviación estándar estimadas.

Chow et al. (1994), indica que, en cuanto al factor de frecuencia para distribuciones de valor extremo, se tiene la siguiente expresión:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \right\}$$

Donde T_r es el periodo de retorno

Gutiérrez (2014), menciona que se puede obtener un periodo de retorno con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$X = \bar{X} + K_T S$$

Donde:

\bar{X} = Media aritmética de la muestra

S = Desviación estándar de la muestra

K_T = Factor de frecuencia

- **Distribución Gamma de tres parámetros o Pearson tipo III**

La distribución Pearson tipo III se aplica para ajustar la distribución de las frecuencias variables, como son el caso de valores de precipitación extrema, crecientes máximos, volúmenes de lluvia de corta duración y entre otras, siendo una de las más utilizadas en la hidrología (Gutiérrez, 2014)

La función densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{|a|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - \delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{x - \delta}{\alpha}\right)$$

Donde α , β y δ son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta)$ viene a ser la función Gamma.

En cuanto la función acumulada, Villón (2006), indica que se representa con la siguiente ecuación:

$$F(x) = \int_{\delta}^x \frac{1}{|\alpha|\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{x-\delta}{\alpha}\right)$$

Para la estimación de parámetros, aplicando el método de momentos, se tienen las siguientes relaciones:

Parámetro de posición (δ)

$$\bar{x} = \alpha\beta + \delta$$

Parámetro de escala (α)

$$S^2 = \alpha^2\beta$$

Parámetro de forma (δ)

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

Donde \bar{x} es la media de los datos, S^2 es su variancia y γ su coeficiente de sesgo, que se define como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3/n}{S^3}$$

En cuanto al factor de frecuencia, en la presente distribución se toman los logaritmos de la información hidrológica, donde el factor de frecuencia tiene a depender del periodo de retorno, así como del coeficiente de asimetría (Chow et al., 1994).

$$K_T = z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5$$

- **Distribución Log Gamma o Log Pearson de 3 parámetros (log Pearson tipo III)**

Siendo x una variable aleatoria y sus logaritmos se ajustan a la distribución Gamma de 3 parámetros, entonces esa misma variable aleatoria x también se ajusta a la distribución Log Gamma, esta distribución se trabaja de igual manera que la de Pearson tipo III. (Gutiérrez, 2014)

La función densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{x|a|\Gamma(\beta)} \left[\frac{\ln(x_y) - \delta}{\alpha} \right]^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(x_y) - \delta}{\alpha}\right)$$

Donde

$$\delta \leq y < \alpha \text{ para } \alpha > 0, \quad \alpha < y \leq \delta \text{ para } \alpha < 0$$

α y β son los parámetros de escala y forma, y δ vendría a ser el parámetro de localización

Mientras que su función acumulada se presenta de la siguiente manera:

$$F_{(x)} = \int_{\delta}^x \frac{1}{|a|\Gamma(B)} \left(\frac{x_y - \delta}{a}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x_y - \delta}{a}\right)}$$

Y dentro de la estimación de sus parámetros, se tiene:

Parámetro de posición (y_0)

$$\delta = \overline{x}_y - \alpha\beta$$

Parámetro de escala (α)

$$\alpha = \frac{s_y}{\beta^2}$$

Parámetro de forma (β)

$$\beta = \left(\frac{2}{C_s'}\right)^2$$

De donde

C_s' es el coeficiente de asimetría o oblicuidad.

\overline{x}_y y s_y son la media y la desviación estándar de los logaritmos de muestra respectivamente.

En cuanto al factor de frecuencia, en la presente distribución se toman los logaritmos de la información hidrológica, donde el factor de frecuencia tiene a depender del periodo de retorno, así como del coeficiente de asimetría (Chow et al., 1994).

$$K_T = z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{C_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{C_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{C_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_s}{6}\right)^5$$

Donde z es la variable normal estandarizada.

b) Test de bondad de ajuste

En esta etapa se realizó la selección de la función de distribución que mejor se ajusta a las precipitaciones máximas utilizando el método

estadístico de Kolmogórov-Smirnov, que permitirá realizar dicho ajuste en base de una muestra, este método tiene la finalidad de conseguir la diferencia máxima del valor absoluto, entre la frecuencia observada de la muestra que viene a ser la función no paramétrica y la función paramétrica para cada valor observado (Chetyrina, 2017), y se expresa a través de la ecuación.

$$D_{max} = \max|F_n(x) - F(x)|$$

Donde, $F_n(x)$ es la función no paramétrica y $F(x)$ es el valor de la función de distribución estimada

La función no paramétrica o función de probabilidad observada se puede obtener de la ecuación:

$$F_n(x) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde, m es el número de orden del dato y n es el número total de datos.

c) Cálculo de precipitaciones máximas de diseño

Con las funciones de distribución establecidas, se utilizará tormentas de diseño que involucren la relación entre intensidad de lluvia, duración y frecuencia de cada una de las series trabajadas, llegando a elaborar hietogramas para cada una de las curvas IDF, en intervalos de media hora para un tiempo total de 12 horas con un periodo de retorno de 50, 100 y 200 años, siendo usadas como datos de entrada en el modelo HEC HMS



Por lo tanto, para el cálculo de la intensidad se evaluó, para determinar cuál se adecua mejor a la cuenca.

d) Relaciones Intensidad – Duración – Frecuencia

En una tormenta de diseño participan tres variables importantes, estas son la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno, existen casos donde existen curvas estándar de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), designadas para algunos lugares específicos. Cuando existe información de lluvia, se puede utilizar el análisis de frecuencia a una distribución probabilística (Chow et al., 1994).

- **Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)**

Las curvas IDF se identificaron en plano cartesiano donde en el eje de las abscisas se encuentra la duración y en el eje de las ordenadas va la intensidad (mm/h), se puede representar mediante expresiones matemáticas como la utilizada en los EE.UU. (Cahuana y Yugar, 2009), que se muestra a continuación:

$$i = \frac{KT^a}{D^b}$$

Donde:

i : Intensidad máxima en mm/hora.

a, b y K : Parámetros.

D : Duración de la precipitación en minutos.

3.5.2.4. Modelo HEC HMS

Para la obtención de caudales máximos en la data histórica, se empleó el modelo semi-distribuido HEC HMS, por ser un modelo versátil y empleado para máximas avenidas, que tiene como finalidad la obtención del hidrograma de escurrimiento para un punto determinado en un sistema de red fluvial. Cuyos componentes se basan en relaciones matemáticas que representan todo el proceso para la circulación y generación de hidrogramas de escurrimiento, usando los hidrogramas de cada subcuenca (P_{sb}), para cada intervalo de tiempo (i), de esta manera se tendrá una media ponderada de las precipitaciones (P_{em}) en las distintas estaciones (j), que tienen influencia sobre la cuenca general (López et al., 2012), esta se representa mediante la siguiente ecuación:

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i, j)w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)}$$

De donde:

$P_{sb}(i)$, viene a expresar la media de la precipitación sobre una cuenca en un intervalo i

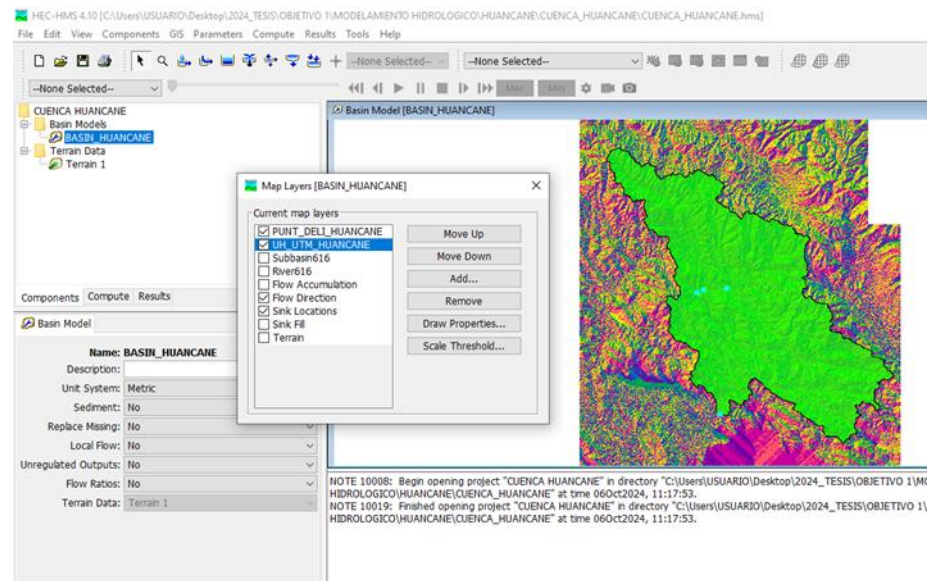
$P_{em}(i, j)$, es precipitación registrada para un intervalo de tiempo i y una estación j

$w(j)$, se considera como el área de influencia de la estación j

n , es número de estaciones con influencia en la cuenca

Figura 13

Proceso de delimitación de Cuenca en HEC HMS



a) Modelo de cuenca:

La delimitación de la cuenca se realizó utilizando el Sistema de Información Geográfica (GIS) disponible en la versión 4.10 del software HEC-HMS. El modelo digital de elevación (DEM) fue procesado para obtener las divisiones hidrográficas que conforman la cuenca Huancané, que se utilizó como la cuenca de estudio mayor debido a la disponibilidad de caudales observados en su punto de salida, lo que es clave para la validación del modelo (Sun et al., 2019)

Dentro de la cuenca Huancané se delimitaron las subcuencas menores, incluyendo la subcuenca Putina, que se divide en cinco unidades hidrográficas para representar mejor la heterogeneidad del terreno y las diferentes respuestas hidrológicas ante los eventos de precipitación (Romero, 2021). Este enfoque permite trabajar con una escala adecuada



tanto para el análisis de la subcuenca como para la validación del modelo a nivel de la cuenca mayor.

b) Método de pérdida:

El método seleccionado para calcular las pérdidas de precipitación fue el del Número de Curva (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EE. UU., debido a su simplicidad y eficacia para representar la infiltración en diferentes tipos de suelo y condiciones de uso del terreno (McCuen, 2005). La fórmula básica utilizada para calcular la esorrentía efectiva es la siguiente:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde:

Q es la esorrentía en mm

P es la precipitacion total en mm

I_a es la abstracción inicial, que es típicamente el 20% de la capacidad máxima de retención (S)

S es la capacidad máxima de retención del suelo, calculada como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El Número de Curva (CN) depende de las características del suelo y del uso del terreno. En este estudio, se asignaron valores de CN a cada una de las cinco unidades hidrográficas de la subcuenca Putina, basados en datos de suelos y cobertura vegetal, siguiendo las directrices



establecidas en el manual de la ANA, donde se utilizaron mapas de uso de suelo y datos históricos de infiltración para ajustar estos valores a las condiciones locales de la cuenca.

c) **Transformación de precipitación en escorrentía**

Se utilizaron tres métodos de transformación de precipitación en escorrentía con el objetivo de comparar sus resultados y seleccionar el más adecuado para las características de la subcuenca Putina.

- **Hidrograma Unitario SCS**

El Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y su capacidad para simular eventos de escorrentía en cuencas de tamaño mediano y grande (USDA, 1986). El método estima el caudal en función del tiempo mediante la siguiente fórmula:

$$Q(t) = \frac{484A}{T_c}$$

Donde:

$Q(t)$, es el caudal en un tiempo específico.

A , es el área de la cuenca en km^2 .

T_c , es el tiempo de concentración en horas.

- **Método de Clark**

El Método de Clark tiene en cuenta el almacenamiento de agua dentro de la cuenca y el tiempo de viaje del agua hacia el punto de salida (Lee, 2019). Este método utiliza dos parámetros principales:

- Tiempo de concentración T_c
- Coeficiente de almacenamiento (R), que refleja la capacidad de la cuenca para almacenar agua antes de que se convierta en escorrentía.

La ecuación del hidrograma unitario de Clark es más detallada que la de SCS, y permite modelar con mayor precisión la distribución temporal de la escorrentía. Estudios recientes han demostrado que este método puede ser más adecuado para cuencas complejas (Marufi y Sa'adi, 2021).

- **Método de Snyder**

El Método de Snyder es un método empírico utilizado para cuencas grandes. La transformación de precipitación a escorrentía se realiza mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_p = C_t(LL_c)^{0.3}$$

$$Q_p = C_q \frac{A}{T_p}$$

Donde:

T_p es el tiempo al pico (horas)

L es la longitud del río principal



L_c es la distancia desde el centroide de la cuenca hasta el punto de salida

C_t y C_q son coeficientes ajustados empíricamente

Cada uno de estos tres métodos se aplicará a las unidades hidrográficas generadas, con los resultados se compararán en el punto de validación de la cuenca Huancané para seleccionar el método más adecuado en función de su capacidad para reproducir los caudales observados.

d) Ruteo del flujo:

El ruteo del flujo se realizó utilizando el método de Muskingum, el cual es un método hidráulico comúnmente utilizado en modelos hidrológicos para simular el comportamiento de la escorrentía a lo largo de un cauce (McCarthy, 1938). Este método considera tanto el tiempo de viaje del flujo como el almacenamiento en el cauce. La ecuación de Muskingum se expresa de la siguiente manera:

$$S_t = K[XQ_{t+1} + (1 - x)Q_t]$$

Donde:

S_t : Es el almacenamiento en el cauce en el tiempo t .

K : Es el tiempo de retardo o tiempo de viaje del flujo (horas).

X : Factor de ponderación, que típicamente varía entre 0 y 0.5.

Q_t y Q_{t+1} , son los caudales en los tiempos



Este método fue seleccionado por su capacidad para representar adecuadamente el almacenamiento de agua y los tiempos de propagación del flujo en ríos y arroyos. Los valores de K y X fueron ajustados para reflejar las condiciones físicas de los cauces de la subcuenca del río Putina.

e) Precipitación de diseño

La precipitación de diseño se determinó mediante el análisis de series históricas de datos de precipitación obtenidas de siete estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca Huancané y subcuenca Putina. Los hietogramas generados proporcionan una distribución temporal de la precipitación, ponderada por la metodología de Gage Weights de HEC-HMS (Singh et al., 2018). Se utilizaron datos de un periodo de retorno de 100 años como punto de partida para las simulaciones iniciales.

Una vez validado el mejor método de transformación de escorrentía, se extenderán las simulaciones para periodos de retorno de 50 años y 200 años. Estos periodos permiten evaluar el comportamiento de la cuenca bajo diferentes escenarios de precipitación extrema.

f) Simulación del evento

La simulación del evento se realizó con un intervalo de 30 minutos durante un periodo total de 18 horas, dado que el tiempo de concentración de la cuenca Huancané de validación, es mayor a 12 horas. Esto permite capturar el desarrollo del hidrograma completo y las variaciones en el caudal durante el evento de lluvia (Zhao, 2021). El intervalo de 30 minutos



se eligió para mantener un balance adecuado entre la precisión y el tiempo de procesamiento.

3.5.3. Seleccionar y aplicar modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 para obtener proyecciones de cambios en la precipitación bajo diferentes escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) en la subcuenca del río Putina

3.5.3.1. Recolección de datos

Los datos que se utilizarán en este capítulo, son principalmente un conjunto de datos de referencia procedentes de las observaciones realizadas por el SENAMHI y otro conjunto procedente de los modelos climáticos globales. Para usar los GCM se descargará la precipitación histórica y simulada sobre nuestra región en estudio, para posteriormente ser comparados con los valores observados (Blázquez, 2011).

a) Descarga de datos de modelos climáticos globales

Para la obtención de datos diarios de precipitación proyectados e históricos de los GCM, se realizó a través de la plataforma de NASA Center for Climate Simulation, del World Climate Research Program (WCRP), mientras que para la obtención de los datos mensuales se ha empleado el portal de Climate Explorer, un portal que proporciona acceso a datos climático globales bajo diferentes escenarios del cambio climático, esta plataforma facilita la selección y descarga de simulaciones climáticas globales bajo distintas trayectorias RCP, donde la variable climática seleccionada para este análisis fue la precipitación (variable “pr” en los archivos NetCDF), cuyo formato se encuentran en archivos del tipo

Network Common Data File (NetCDF), que viene a ser una matriz multidimensional con datos variables en una extensión (.nc), que serán leídos en lenguaje de programación R. Los modelos disponibles empleados se escogieron tomando en cuenta que tengan el mismo rango de datos diarios en el periodo de 1850-2100, seleccionando 18 GCM, para ser evaluados, que se muestran en la tabla N°6.

Tabla 6*Modelos Climáticos Globales (GCM)*

MODELO	INSTITUCIÓN	RESOLUCIÓN (° DE ARCO1)
ACCESS1-0	Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia	~1.25 x 1.875
BNU-ESM	Universidad Normal de Beijing de China	3.60 x 2.00
CCSM4	Centro Nacional de investigación Atmosférica de EE.UU.	1.25 x 0.9424
CESM1-BGC	Centro Nacional de investigación Atmosférica de EE.UU.	0.94 x 1.25
CNRM-CM5	Formación Avanzada de Computación Científica de Francia	1,4 x 1,39
CSIRO-Mk3-6-0	Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia	1.875 x 1.8653
CanESM2	Centro Canadiense de Análisis y Modelización del Clima de Canadá	2.80 x 2.80
IPSL-CM5A-LR	Instituto Pierre Simón Laplace de Francia	3.75 x 1.8947
IPSL-CM5A-MR	Instituto Pierre Simón Laplace de Francia	2.5 x 2.5352
MIROC-ESM	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón	2.8125 x 2.7906
MIROC-ESM-CHEM	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón	2.8125 x 2.7906
MIROC5	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón	1.40625 x 1.4008
MPI-ESM-LR	Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania	~1.80 x 1.80
MPI-ESM-MR	Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania	1.875 x 1.85
MRI-CGCM3	Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania	1.125 x 1.12148
NorESM1-M	Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Japón	2.50 x 1.8947
BCC-CSM1-1	Centro Bjerknes para la Investigación del Clima, Instituto Meteorológico de Noruega	2.8125 x 2.7906
INMCM4	Academia de Ciencias de Rusia, Instituto de matemáticas Numéricas de Rusia	2.00 x 1.50

Nota: En la tabla se presentan los 18 GCM descargados, para escenarios RCP 4.5 y 8.5.



b) Descarga de datos PISCO

Para la evaluación de los modelos climáticos globales (GCM) en la representación de la precipitación en el Perú, se utilizaron los datos observados del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological Observations). Este conjunto de datos ofrece estimaciones diarias de precipitación con una resolución espacial de 5 km x 5 km, cubriendo todo el territorio peruano para el período de 1981 a 2014. Los datos fueron desarrollados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, utilizando un enfoque de interpolación que integra mediciones de estaciones meteorológicas con técnicas estadísticas avanzadas. La alta resolución y confiabilidad de estos datos hacen que PISCO sea una referencia clave para la evaluación de los modelos climáticos en la región andina.

La descarga y procesamiento de los datos PISCO fueron desde el portal de datos abiertos de SENAMHI. El producto cubre el período de 1981 a 2014, el cual fue utilizado como base de comparación en el análisis del período de control para los modelos GCM seleccionados. La precipitación diaria fue agrupada a escala mensual para facilitar la comparación con los modelos climáticos. Los datos fueron procesados utilizando el lenguaje de programación R, y se realizaron interpolaciones espaciales donde fuera necesario para igualar la resolución espacial de los modelos GCM.

3.5.3.2. Post procesamiento de datos GCM

De la tabla de Modelos Climáticos Globales, se observa que cada modelo cuenta con diferentes resoluciones espaciales, por otra parte, inicialmente cada GCM cuenta datos crudos que se tienen una unidad de $\text{kg/m}^2/\text{s}$ en precipitación, las cuales serán procesadas inicialmente.

El proceso de post-procesamiento de los datos obtenidos de los GCM fue llevado a cabo utilizando el lenguaje de programación R, mediante diferentes paquetes como son 'ncdf4', 'devtools', 'raster', 'maps', 'xlsx', 'zoo', 'exactextractr' y 'rgdal'. Este paso fue crucial para adaptar los datos a las condiciones locales, corregir las diferencias de unidades y resolver problemas espaciales relacionados con la proyección y resolución de los datos.

a) Lectura de datos NetCDF

Los datos descargados de los 18 modelos climáticos fueron almacenados en formato NetCDF. Este formato es ideal para manejar grandes conjuntos de datos climáticos, ya que permite estructurar la información en múltiples dimensiones (por ejemplo, tiempo, latitud, longitud).

Para la lectura de estos archivos, se utilizó el paquete 'ncdf4' en R, que facilita la extracción de las variables de interés (en este caso, la precipitación) y el manejo de los datos en sus respectivas dimensiones.



b) Recorte Espacial

Los modelos climáticos globales suelen tener una cobertura geográfica global o de gran extensión, por lo que se requirió hacer un recorte espacial de los datos a la región específica, para hacer comparaciones con los datos locales de precipitación (conocidos como PISCO).

El recorte espacial fue realizado mediante el uso del paquete 'rgdal' en R, que permite manejar proyecciones espaciales y recortar los datos a una región definida mediante un shapefile.

c) Conversión de unidades

Las unidades de precipitación en los modelos climáticos globales generalmente se presentan en kilogramos por metro cuadrado por segundo ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$), que son las unidades estándar en los modelos de simulación, para hacerlos menos pesados. Sin embargo, para poder comparar estos datos con las mediciones locales del conjunto de datos PISCO, fue necesario realizar una conversión a unidades convencionales de precipitación, como milímetros por día ($\text{mm}/\text{día}$).

El cálculo de la conversión se realiza de la siguiente manera:

$$1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{s}=86400 \text{ mm}/\text{día}$$

$$1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{s}=86400 * 30 \text{ mm}/\text{mes}$$

Esta conversión se aplicó a todos los datos de precipitación de los GCM antes de realizar comparaciones con los datos observados.



d) Suavizado de la resolución

Los modelos climáticos globales suelen tener resoluciones espaciales relativamente bajas (del orden de 100-250 km). Para que las proyecciones sean comparables con los datos locales de alta resolución de PISCO, fue necesario aplicar un suavizado o interpolación espacial a los datos de los GCM.

Este proceso se realizó para asegurar que los datos de los GCM pudieran compararse directamente con los datos PISCO, los cuales tienen una mayor resolución espacial. Se utilizó el paquete raster para realizar el reescalado de la resolución.

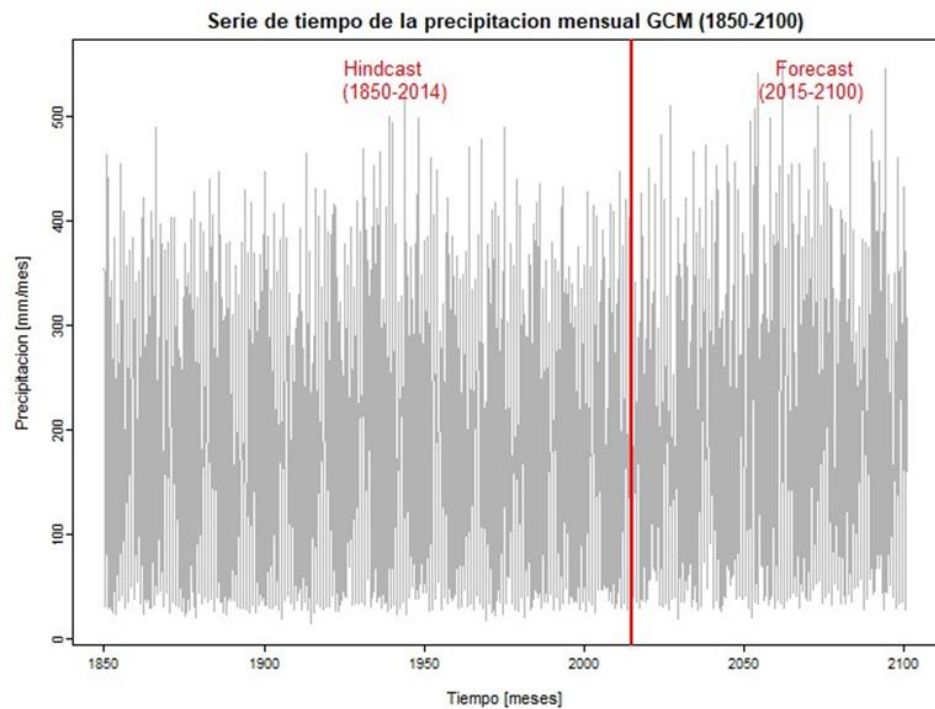
3.5.3.3. Selección del modelo GCM

Para la selección de los GCM más representativos, de la zona de estudio, se tomará en cuenta la estacionalidad de las lluvias como indicador de mejor representación de CGM, conjuntamente con un estadístico de métricas, para seleccionar así el mejor modelo de los 18 GCM evaluados.

Primeramente, se extrajo los datos a nivel de Unidades Hidrográficas (UH) de las sub cuenca, para un periodo de control de 1981 – 2014 y un periodo futuro para un escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 2015 – 2100, de los GCM, por otra parte, también se extrajo la data observada para el periodo de control a nivel de UH del Proyecto PISCO del SENAMHI.

Figura 14

Serie de tiempo de la precipitación mensual del GCM en la UH 01785



Posteriormente con los datos históricos observados y simulados, del periodo de control se realiza una evaluación grafica de sesgo de los GCM en el periodo de control para cada UH, comparando de esta forma las series de tiempo a nivel mensual y anual, para obtener una visualización de la variación espacial, así mismo se realiza la evaluación numérica del sesgo para escoger los modelos seleccionados que mejor se adecuan al área de estudio.

Para la determinación de los mejores modelos se usó el PBIAS, y se escoge los modelos con un menor porcentaje de sesgo, para validar la selección, analizando la precisión y capacidad predictiva de los GCM, en comparación con los datos observados, es fundamental aplicar un conjunto de pruebas estadísticas ampliamente utilizadas en estudios de validación de modelos hidrológicos y climáticos. Las métricas consideradas fueron el

Error Medio Absoluto (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el Sesgo (BIAS), el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), el Índice de Concordancia de Willmott (d) y la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). A continuación, se presenta la metodología detallada para cada prueba y su interpretación de resultados.

a) Error Medio Absoluto (MAE)

El MAE mide el promedio de los errores absolutos entre los valores observados y los valores predichos por el modelo, proporcionando una medida de la magnitud del error (Willmott et al., 2012). La ecuación para calcular el MAE es:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|$$

Donde:

N es el número total de observaciones.

O_i es el valor observado en el tiempo i .

P_i es el valor predicho por el modelo en el tiempo i .

Según (Li et al., 2020), el MAE se utiliza ampliamente en la evaluación de modelos climáticos porque es menos sensible a grandes errores en comparación con el RMSE.

b) Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

El RMSE mide la raíz cuadrada de la media de los errores cuadrados, penalizando los errores grandes más que el MAE (Willmott et al., 2012). La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}$$

Interpretación: Un valor más bajo de RMSE indica un mejor ajuste del modelo, con una menor variabilidad en las diferencias entre las predicciones y las observaciones. Esta métrica es útil cuando se desea enfatizar la importancia de grandes desviaciones (Moriasi et al., 2007).

c) Sesgo (BIAS)

El sesgo mide la diferencia media entre los valores observados y predichos, indicando si el modelo tiende a sobreestimar o subestimar los valores observados (Li et al., 2020). La fórmula es:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)$$

Interpretación:

- Un valor de sesgo cercano a cero indica un buen ajuste.
- Un sesgo positivo indica que el modelo tiende a sobreestimar.
- Un sesgo negativo indica subestimación sistemática.

d) Coeficiente de Correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación de Pearson r mide la relación lineal entre las observaciones y las predicciones del modelo, evaluando la fuerza y dirección de dicha relación (Willmott et al., 2012). Se calcula como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}}$$

Donde:

\bar{O} y \bar{P} , son las medias de las observaciones y las predicciones, respectivamente.

Interpretación:

- Un valor de r cercano a 1 indica una fuerte correlación positiva.
- Un valor de r cercano a -1 indica una fuerte correlación negativa.
- Un valor de r cercano a 0 indica baja o nula correlación.

e) Índice de Concordancia de Willmott (d)

El índice d de Willmott mide el grado de concordancia entre las observaciones y las predicciones, variando de 0 a 1 (Willmott et al., 2012). Se calcula como:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Interpretación:

- Un valor de d cercano a 1 indica un alto grado de concordancia.

- Un valor cercano a 0 indica baja concordancia entre el modelo y las observaciones.

f) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

La eficiencia de Nash-Sutcliffe mide la capacidad del modelo para predecir los valores observados con precisión (Moriassi et al., 2007). La ecuación para calcular el NSE es:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2}$$

Interpretación:

- Un valor de $NSE = 1$ indica una predicción perfecta.
- Un valor de $NSE > 0.5$ indica un buen ajuste.
- $NSE = 0$ indica que el modelo predice tan bien como la media de las observaciones.
- $NSE < 0$ sugiere que el modelo predice peor que la media observada.

3.5.3.4. Corrección de sesgo

Para realizar la corrección de sesgo, se utilizó el método reducción de escala estadístico con la técnica de Mapeo de Cuantiles, para reducir el sesgo de la información meteorológica proyectada, para lo cual Pino et al. (2022), nos indica que esta técnica fue elaborada para adaptar la distribución de los datos modelados en base a los datos observados, realizando correcciones en los modelos climáticos regionales, y para el caso de la precipitación se utiliza la siguiente expresión a través de la plataforma de R-Studio:

$$y_{corr,yo}^F = F_y^{-1}[F_X(X_i^F)]$$

Donde:

$y_{corr,yo}^F$: es el valor futuro corregido en un tiempo i .

$F_X(x), F_Y(x)$: son funciones de distribución acumulativa empírica del modelo (x), y las observaciones (y).

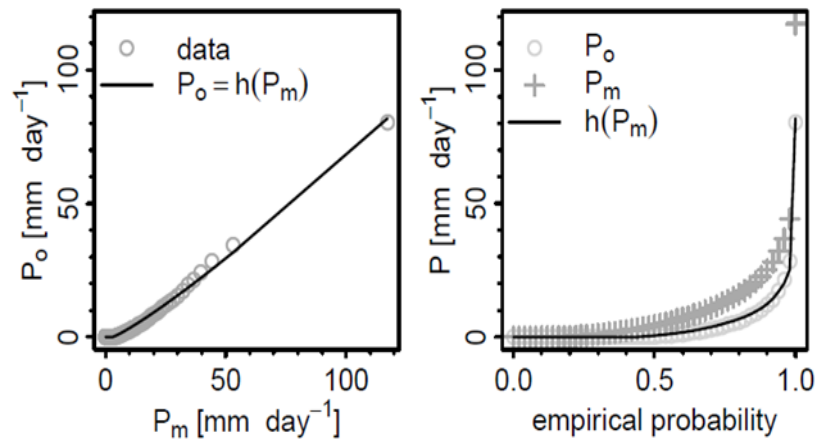
Así mismo, esta metodología fue detallada por Gudmundsson et al. (2012), quien describe que las transformaciones estadísticas son aplicaciones de la transformación integral de probabilidad, y buscan una forma de que una función (h), realice el mapeo de una variable modelizada (P_m), con el propósito de obtener una nueva distribución que se asemeje a la de la variable observada (P_o), así se tendría que (P_o) viene a ser una precipitación observada – histórica, y P_m como una precipitación modelizada, denotándose esta transformación de manera general como:

$$P_o = h(P_m)$$

Por lo tanto, de la figura de diagrama de cuantiles, en la imagen izquierda se apreciará el diagrama cuantil de P_o y P_m , mientras que en la imagen derecha se tendrá la función cuantil de los valores observados.

Figura 15

Diagrama de cuantiles



Nota. Extraído de (Gudmundsson y Engen, 2012)

Para una variable de interés ya sea de precipitación o temperatura, se define la transformación, como:

$$P_o = F_o^{-1}(F_m(P_m))$$

Donde F_m , es la función de distribución empírica de P_m , y F^{-1} es la función inversa o función cuantil correspondiente de P_o .

Para resolver la ecuación P_o , una de las maneras propuestas es utilizar distribuciones teóricas que comúnmente lo usan para ajustar la precipitación modelizada mediante transformaciones paramétricas que se muestran a continuación:

$$\hat{P}_o = bP_m$$

$$\hat{P}_o = a + bP_m$$

$$\hat{P}_o = bP_m^c$$

$$\hat{P}_o = b(P_m - x)^c$$

$$\hat{P}_o = (a + bP_m)(1 - e^{-(P_m-x)/\tau})$$

Donde \hat{P}_o es un indicador de la mejor estimación para P_o , y a, b, c, x junto con τ , son parámetros sujetos a calibración.

3.5.4. Simular el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos futuros 2025-2075, mediante el modelo hidrológico HEC HMS

Para cumplir con el presente objetivo, se implementará un procedimiento metodológico centrado en el modelamiento hidrológico de los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, utilizando el software HEC-HMS. El insumo principal será la precipitación proyectada por el GCM con menor sesgo para la subcuenca del río Putina, seleccionada en el Objetivo 2. Este enfoque metodológico se sustenta en estudios recientes que utilizan modelos hidrológicos para proyectar el impacto del cambio climático en las cuencas hidrográficas (Ahmed, 2020; Sun et al., 2019). A continuación, se detallan los pasos metodológicos realizados:

3.5.4.1. Parámetros Físicos de la Cuenca

Para el modelamiento hidrológico se utilizarán los mismos parámetros físicos de la cuenca establecidos en el Objetivo 1, incluyendo el área de drenaje, la longitud del cauce principal, el uso del suelo y las características del terreno. Estos parámetros son fundamentales para definir el comportamiento de la escorrentía y los caudales en el modelo (Romero y Martínez, 2021). En esta fase, la única variable que se



modificará será la precipitación proyectada bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, permitiendo así evaluar el impacto directo del cambio climático sobre los caudales máximos. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios que analizan la respuesta hidrológica ante variaciones en las precipitaciones bajo escenarios de cambio climático (Marufi y Sa'adi, 2021).

3.5.4.2. Información Meteorológica y Reducción de Escala

En esta etapa, la precipitación es la variable clave del estudio. Ya se ha determinado en el Objetivo 2 el modelo climático global más representativo para la cuenca, y se ha llevado a cabo un proceso de reducción de escala mediante el mapeo de cuantiles para adaptar los datos de los GCM a la resolución diaria, utilizando datos históricos observados (Sun et al., 2019). Las precipitaciones máximas anuales se obtendrán a partir de las proyecciones de los modelos climáticos y, al igual que en el primer objetivo, se procederá a su análisis mediante funciones de distribución de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste. Estas pruebas son esenciales para validar la idoneidad de las distribuciones, siguiendo enfoques similares a los aplicados en otros estudios de hidrología climática (Güldal y Kurtuluş, 2020).

A continuación, se calcularán las precipitaciones de diseño para los mismos periodos de retorno utilizados en el análisis de datos históricos (50, 100 y 200 años). Estas precipitaciones se convertirán en hietogramas utilizando las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), proporcionando así los datos de entrada necesarios para la simulación en



HEC-HMS bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Este enfoque asegura que las proyecciones de precipitación sean coherentes con los patrones climáticos regionales, como se ha demostrado en estudios previos sobre el impacto del cambio climático en cuencas andinas (Pérez y Campos, 2020).

3.5.4.3. Procesos Hidrológicos en HEC-HMS

Para el modelamiento hidrológico en HEC-HMS, se mantendrán las mismas condiciones de entrada utilizadas en la simulación de caudales observados, a excepción de la precipitación proyectada. Los parámetros físicos de la cuenca, el modelo de pérdidas, la transformación de precipitación a escorrentía y el ruteo de flujo se conservarán sin cambios, lo que permitirá comparar directamente los resultados obtenidos bajo condiciones actuales con los proyectados bajo los escenarios climáticos.

El uso de las mismas condiciones de entrada garantiza la coherencia en el análisis y permite una evaluación precisa de la variabilidad en los caudales máximos como resultado de las diferentes intensidades de precipitación. Este enfoque metodológico es consistente con investigaciones recientes que aplican modelos hidrológicos para estudiar la respuesta de las cuencas bajo escenarios climáticos proyectados (Singh, 2018).

3.5.4.4. Comparación de Resultados y Evaluación de Impactos

Finalmente, se realizará una comparación detallada entre los caudales máximos obtenidos bajo condiciones climáticas históricas y los caudales simulados para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Esta



comparación permitirá evaluar el impacto del cambio climático en la magnitud y frecuencia de los caudales máximos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE LA SUBCUENCA PUTINA, EN RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN, UTILIZANDO DATOS HISTÓRICOS OBSERVADOS

4.1.1. Procesamiento de la cuenca

La sub cuenca del río Putina presenta una serie de características y parámetros que influyen significativamente en su hidrología y geomorfología, a nivel general la delimitación de la sub cuenca, cuenta con los siguientes parámetros que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7

Parámetros geomorfológicos

Parámetro	
Área (km ²)	1840.81
Perimetro (km)	279.76
Longitud cauce Lc (km)	71.58
Pendiente de cauce (S)	1.26
Longitud máxima de Cuenca Lm (km)	125.76
Rectángulo Equivalente (B)	14.66
Índice de Compacidad (Kc)	0.024
Factor de Forma (Ff)	0.117
Coefficiente de Uniformidad (K)	1.7198

Por otra parte, se generaron 05 unidades hidrológicas en referencia al estudio realizado por la ANA, cuyos parámetros necesarios para el modelamiento hidrológico se detallan en la tabla 8.

Tabla 8*Unidades hidrográficas generadas*

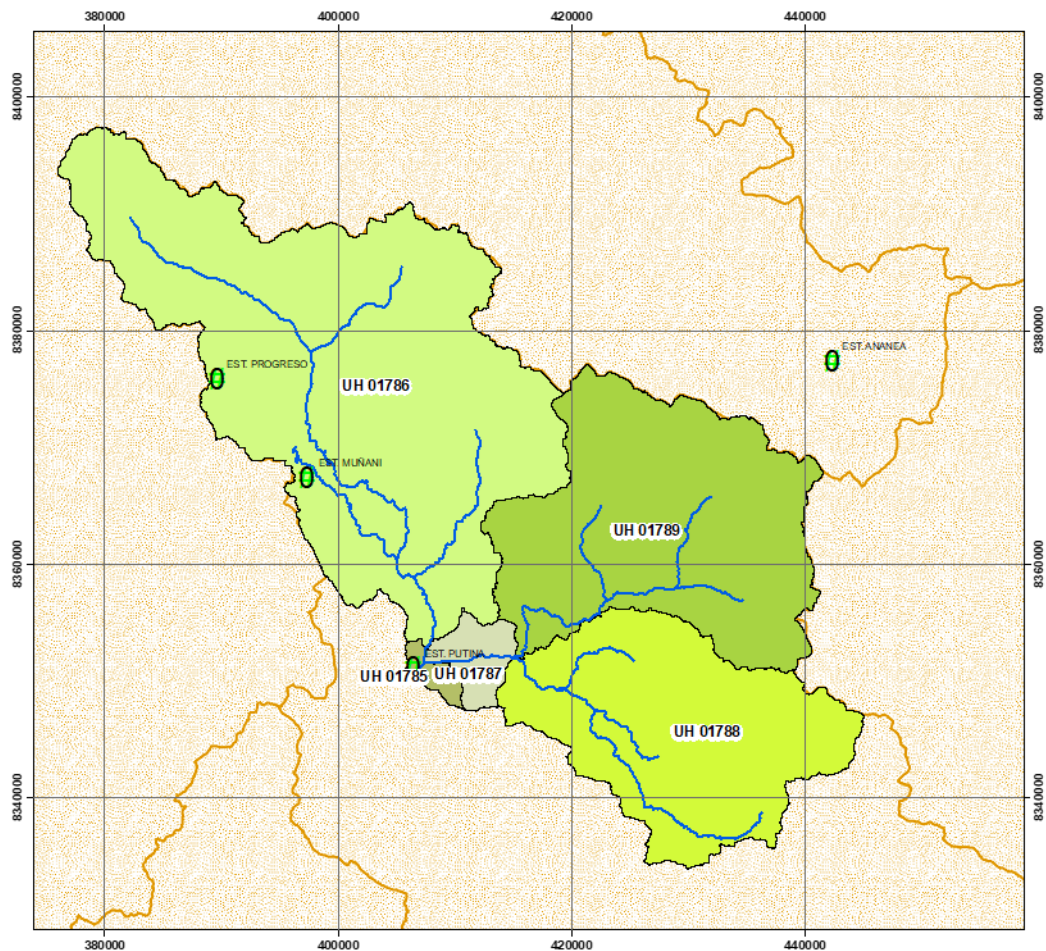
Sub cuenca	UH	Area (km ²)	Lc (km)	Cota mayor (msnm)	Cota menor (msnm)	S (m/m)	CN	Tc final (hr)	Tlag (min)
Muñani	01786	887.12	73.64	4894	3905	0.01298	73.64	10.20	369.00
Alto Huancané	01789	505.78	47.57	5038	3913	0.02363	74.00	7.32	263.00
Medio alto Huancané	01787	36.47	13.47	4114	3905	0.01544	74.00	3.56	128.00
Medio Huancané	01785	15.55	9.26	4247	3898	0.03779	72.52	2.42	87.00
Pistune	01788	395.42	53.90	4966	3913	0.01952	74.71	6.77	244.00

Nota: En la tabla se presentan los diferentes valores y datos para cada unidad hidrográfica como entrada del componente cuenca del HEC-HMS

Los resultados obtenidos de la tabla 7, nos dan como perímetro una distancia de 279.76 kilómetros lo cual indica que la cuenca tiene una extensión considerable, lo que implica una longitud de flujo más larga y una mayor interacción con áreas circundantes, así mismo cuenta con un área de 1840.34 kilómetros cuadrados, siendo un tamaño sustancial, esto significa que tiene capacidad para acumular una cantidad significativa de agua durante episodios de lluvias intensas, esta área también puede influir en la cantidad de caudal que fluye a través de los cursos de agua de la cuenca y puede ser un factor importante a considerar en la gestión de recursos hídricos y en el diseño de infraestructuras hidráulicas. Mientras que el índice de compacidad de 0.024 y el factor de forma de 0.117 revelan que la cuenca del río Putina tiene una forma más alargada y estrechada, esta forma puede influir en la forma en que el agua se distribuye y fluye dentro de la cuenca, concentrándose en ciertas áreas y presentando un tiempo de concentración potencialmente mayor. En cuanto al coeficiente de uniformidad de 1.7198 muestra que la cuenca tiene una variabilidad considerable en las pendientes, indicando que existen áreas con pendientes más pronunciadas y áreas con pendientes más suaves dentro de la cuenca.

Figura 16

Unidades hidrográficas de la cuenca del río Putina



Según la figura 16 y tabla 8, se observa que cuenta con 5 unidades hidrográficas, de las cuales la UH 1786, 1788 y 1789 son equivalentes al estudio realizado por la ANA en la cuenca Huancané, que representan un gran aporte hidrológico, por la extensión de área. En resumen, la cuenca Putina se caracteriza por su extensión significativa, un tamaño considerable, una pendiente moderada, una forma alargada y estrechada, con un tiempo de concentración relativamente largo y una variabilidad en las pendientes.

4.1.2. Tratamiento de información meteorológica

Como parte del primer objetivo específico se realizó el procesamiento de los datos crudos donde la base informativa de este estudio se fundamenta en los registros de las estaciones meteorológicas que ejercen influencia directa en la subcuenca. Siendo la variable central de este trabajo la precipitación, por lo que se ha llevado a cabo un riguroso tratamiento estadístico para validar la información histórica disponible.

4.1.2.1. Análisis estadístico de datos

Siendo la validación de la información histórica crucial para garantizar la solidez de la investigación, permitiendo así la ejecución de una modelación matemática adecuada que reproduzca la relación entre la precipitación y la escorrentía. El análisis tuvo siguientes resultados:

a) Análisis exploratorio

Este análisis se llevó a cabo mediante la aplicación de técnicas visuales como el diagrama de histogramas y el análisis de diagramas de cajas, sobre las siete estaciones meteorológicas que ejercen influencia significativa sobre la Subcuenca Putina, cuyos resultados detallados se presentan de manera gráfica en el anexo A, detallándose el enfoque visual de las distribuciones y variabilidades de los datos recopilados por cada estación meteorológica, ofreciendo una comprensión más profunda de los patrones y tendencias presentes.

Así mismo se realizó una exploración de la cantidad de datos con que cuenta cada estación como se aprecia en la tabla 9, de igual manera se puede ver de forma gráfica el mapa de calor en la figura 17.

Tabla 9

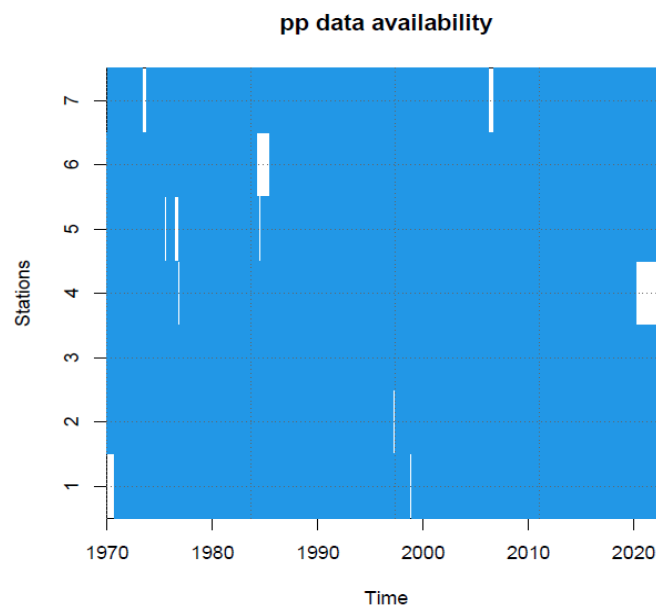
Porcentaje de datos diarios entre 01/01/1970 al 31/12/2022

Estación	% Completos	% Incompletos	Cant. Completos	Cant. Incompletos
ANANEA	98	2	18875	483
COJATA	99	1	19088	270
CRUCERO	99	1	19219	139
HUANCANE	94	6	18186	1172
MUÑANI	98	2	18943	415
PROGRESO	96	4	18623	735
PUTINA	97	3	18731	627

De acuerdo a la tabla 9, se aprecia que existen datos incompletos para cada estación, teniendo una mayor cantidad de datos incompletos, en la estación Huancané.

Figura 17

Disponibilidad de datos de precipitación histórica (observada)



Nota: En la imagen izquierda se aprecia de color celeste la disponibilidad de datos por estaciones, Ananea (1), Cojata (2), Crucero (3), Huancané (4), Muñani (5), Progreso (6) y Putina (7)

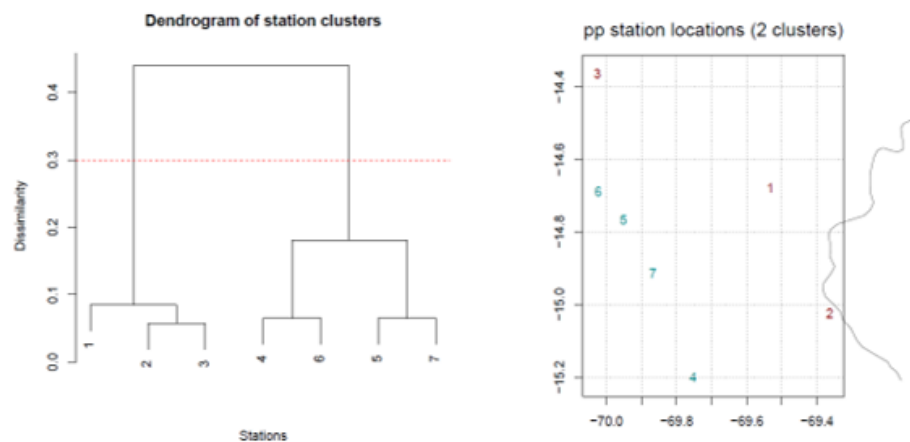
b) Completación de datos faltantes y homogeneización de series

Del paquete Rclimatol detallado en la metodología, se muestra en el anexo B, el resultado del primer análisis exploratorio de datos diarios de cada estación, mediante las gráficas de anomalías y ajustes.

De la figura 18, se aprecia el clusters realizado en dos grupos según la elevación de las estaciones, el primero conformado por las estaciones Ananea, Cojata y Crucero, el segundo grupo conformado por las estaciones Huancané, Muñani, Progreso y Putina.

Figura 18

Generación de clusters por Rclimatol



Nota: Estación Ananea (1), Cojata (2), Crucero (3), Huancané (4), Muñani (5), Progreso (6) y Putina (7).

Tabla 10*Clusters grupo 1*

Estación	N° Años	Des. Est. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	Des. Est. Desvíos
Ananea	42	98.322	0.15	675.318	0.12
Cojata	45	136.9	0.18	770.36	0.12
Crucero	48	273.774	0.34	815.817	0.18

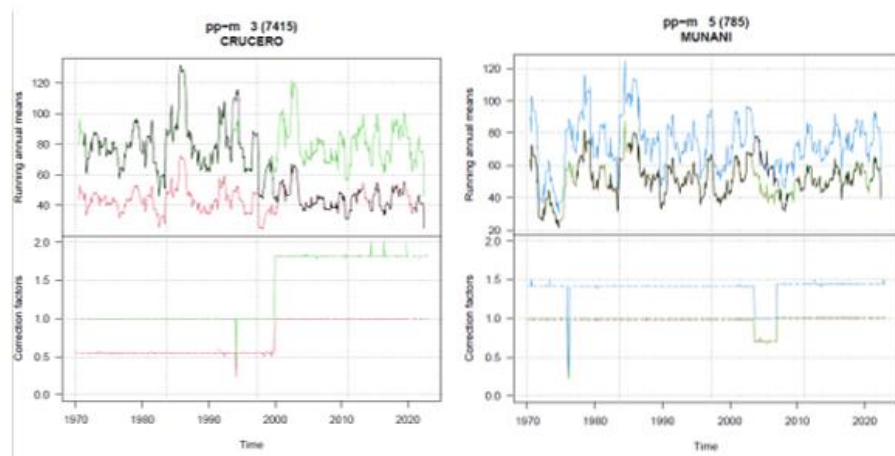
Tabla 11*Clusters grupo 2*

Estación	N° Años	Des. Est. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	Des. Est. Desvíos
Huancane	44	139.829	0.2	716.35	0.09
Muñani	45	134.853	0.2	662.296	0.12
Progreso	43	106.553	0.16	661.814	0.09
Putina	42	119.643	0.17	712.644	0.11

De la homogenización y análisis exploratorios en R, se presentaron anomalías en 2 estaciones, la de Crucero con un punto de corte en 2000-01-01 y la de Muñani con dos puntos de corte, un primer punto de corte en 2003-09-01 y un segundo punto de corte en 2007-01-01.

Figura 19

Reconstrucción de series anómalas



De la figura 19, se aprecia en la parte superior el trazo de las medias anuales móviles reconstruidas, donde las líneas negras representan los datos originales y la de colores las rellenadas, por otro lado en la parte inferior de las gráficas, se muestran las correcciones aplicadas en los puntos de corte.

Una vez reconstruido todas las series en base a sus subperiodos homogéneos, a continuación se muestran los parámetros obtenidos del proceso de completación y homogenización de datos.

Tabla 12*Parámetros obtenidos del paquete R Climatol*

Ítem	Code	Name	ACmx	SNHT	RMSE	POD
1	826	Ananea	0.06	9.9	3.2	97
2	827	Cojata	0.03	11.8	4	98
3	7415	Crucero	0.04	9.6	2.9	42
4	786	Huancane	0.04	12	4.3	93
5	785	Muñani	0.04	24.2	3.1	29
6	778	Progreso	0.03	9.6	3.8	96
7	157414	Putina	0.04	14.5	3.4	96
8	7415-2	Crucero- 2	0.05	12.7	5.6	56
9	785-2	Munani-2	0.11	41.4	3.4	61
10	785-3	Munani-3	0.12	17.8	3.9	6

Nota: del cuadro se tiene que ACmx (Auto-correlaciones absolutas máximas de estación de anomalías), SNHT (Prueba de homogeneidad normal estándar - en series de anomalías), RSME (Error cuadrático medio de la raíz de los datos estimados), POD (Porcentaje de datos originales).

Al presentarse anomalías en las estaciones de Crucero y Muñani, se generó series alternativas en cada punto de corte, como se observa en la tabla 12, para el caso de la estación Crucero se seleccionó los resultados del ítem 3 que pertenecen al code 7415, que tiene un menor porcentaje de RMSE y SNHT, a los que se presentan en el ítem 8 (code 7415-2), mientras que para la estación de Muñani se optó por el ítem 5 (code785), puesto que el comportamiento según la figura 19, es similar al ítem 9 (code 785-2) y a pesar que esta cuenta con mayor cantidad de datos, el ítem 3 (code 7415) presenta un mejor RMSE y SNHT.

Las datas completadas para cada una de las estaciones procesadas se muestran en el ANEXO 3, donde se presentan los datos mensuales acumulados obtenidos.

c) Análisis de consistencia

El análisis de consistencia se realizó en dos periodos, el primer periodo es de enero de 1970 a diciembre de 1996 (324 datos), y el segundo periodo entre enero de 1997 a diciembre del 2022 (312 datos), se empleó los mismos periodos para todas las estaciones con datos completados, donde en la tabla 13, se muestra el resultado de las series, para la prueba T en las medias todas las estaciones alcanzan un nivel de significancia de 5%, mientras que la prueba F para la desviación estándar, solo la estación Crucero no cumple con la probabilidad a un 95% .

Tabla 13

Prueba de T y F para las estaciones

Estación	Media			Desviación		
	Tc	Tt (95%)	$ Tc \leq Tt$ (95%)	Fc	Ft (95%)	$Fc \leq Ft$ (95%)
Ananea	0.176	1.964	Cumple	1.024	1.203	Cumple
Cojata	0.577	1.964	Cumple	1.079	1.204	Cumple
Crucero	0.399	1.964	Cumple	1.354	1.203	No cumple
Huancane	0.502	1.964	Cumple	1.132	1.204	Cumple
Muñani	0.109	1.964	Cumple	1.188	1.212	Cumple
Progreso	0.485	1.964	Cumple	1.191	1.203	Cumple
Putina	0.829	1.964	Cumple	1.107	1.204	Cumple

En cuanto a la tendencia en la media y la desviación estándar, no presentan tendencias significativas, esta se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla 14*Análisis de tendencia en la media y desviación estándar*

Estación	MEDIA		Tendencia	Desviación		
	Tc	Tt (95%)		Fc	Ft (95%)	Tendencia
Ananea	-0.1762	1.9637	-0.0018	0.7872	2.0076	0.0652
Cojata	-0.7863	1.9637	-0.0094	-0.9595	2.0076	-0.0934
Crucero	-0.2929	1.9637	-0.0025	2.2283	2.0076	0.1939
Huancané	-0.5496	1.9637	-0.0069	-0.8206	2.0076	-0.0917
Muñani	0.3963	1.9637	0.0044	1.1006	2.0076	0.1738
Progreso	0.1985	1.9637	0.0023	1.5347	2.0076	0.123
Putina	-1.0245	1.9637	-0.0121	-1.2814	2.0076	-0.1171

d) Análisis de estacionariedad

Del análisis de estacionariedad realizado, estos se muestran en el Anexo D, donde del análisis realizado a los datos completados se tiene que, para las series de tiempo en todas las estaciones, presentan valores de confianza mayores al 95% con respecto al estadístico Z.

Una vez completada la integración de las series diarias, de las 7 estaciones se descarta la estación de Crucero, por tener una influencia mínima en la cuenca, así como a pesar de haber realizado la homogenización no cumplió las expectativas de las pruebas de desviación estándar, por lo que en adelante se cuenta con 6 estaciones donde se demuestra que los datos son consistentes y homogéneos. Esta fase de verificación garantiza la confiabilidad de la información recopilada, confirmando su coherencia temporal y uniformidad. La robustez de estos datos se convierte en un cimiento sobre el cual se desarrolla la investigación para el cálculo de caudales máximos y para el proceso de reducción de sesgo a escala diaria de los GCM.

4.1.3. Selección de precipitación máxima

A partir de las series de datos consistentes, se procedió a la extracción de los valores correspondientes a las precipitaciones máximas de 24 horas anuales en cada estación. Este proceso incluyó la aplicación de pruebas de detección de datos dudosos, mediante las cuales se establecieron umbrales máximos y mínimos para cada serie máxima. Los umbrales de estas evaluaciones se presentan en la tabla 15, evidenciando que los datos son confiables y aptos, respaldando así la calidad y confiabilidad de los resultados que posteriormente se obtendrán en el marco de la investigación.

Tabla 15

Prueba de datos dudosos

Nº	AÑO	ANANEA	COJATA	HUANCANE	MUÑANI	PROGRESO	PUTINA
1	1970	18.5	35.5	47.5	26.8	26.8	38.1
2	1971	16.1	37.3	44.0	23.7	42.5	43.8
3	1972	16.2	48.4	35.0	13.3	34.1	30.0
4	1973	22.6	22.0	39.5	18.5	38.3	43.4
5	1974	14.0	25.0	39.0	17.8	17.4	30.9
6	1975	15.4	34.6	36.0	14.5	19.8	16.7
7	1976	14.6	23.0	21.0	12.9	34.9	28.4
8	1977	18.3	37.0	34.1	23.2	30.0	43.2
9	1978	15.6	33.4	45.2	31.8	37.0	32.7
10	1979	16.1	24.8	36.8	22.7	20.2	35.7
11	1980	16.5	29.6	32.4	19.7	22.0	26.6
12	1981	26.5	35.0	42.2	23.7	27.5	52.2
13	1982	24.5	33.1	38.2	21.0	27.7	38.3
14	1983	12.2	34.0	21.2	13.6	19.1	32.0
15	1984	26.7	33.6	46.6	30.7	17.9	33.4
16	1985	19.1	68.9	42.2	18.1	21.7	36.3
17	1986	19.3	31.0	39.4	21.1	28.5	30.2
18	1987	14.0	35.1	58.0	19.7	44.6	33.2
19	1988	11.6	38.6	52.4	21.2	21.5	25.8
20	1989	16.0	24.8	35.2	20.3	38.1	21.2
21	1990	15.2	25.0	23.8	23.7	25.0	26.7
22	1991	17.3	26.7	58.0	21.6	24.8	33.0
23	1992	13.5	55.5	48.5	23.7	20.9	26.0
24	1993	12.1	23.7	34.2	16.0	28.2	36.4
25	1994	19.6	34.0	68.7	18.8	30.2	28.0
26	1995	18.2	27.5	35.0	23.7	34.2	32.0
27	1996	22.4	20.2	51.6	18.5	30.0	46.1
28	1997	16.2	33.7	38.6	29.1	37.4	46.5



Nº	AÑO	ANANEA	COJATA	HUANCANE	MUÑANI	PROGRESO	PUTINA
29	1998	17.9	22.1	54.5	16.7	28.0	44.5
30	1999	19.2	32.5	45.0	23.1	26.2	31.6
31	2000	25.2	21.6	28.4	15.9	25.6	37.7
32	2001	23.6	28.1	29.7	24.9	30.5	36.5
33	2002	23.8	34.4	32.0	15.7	41.2	29.0
34	2003	36.9	61.1	39.2	34.4	29.8	43.5
35	2004	31.0	40.8	35.9	47.2	28.1	37.9
36	2005	21.4	19.2	26.4	44.0	42.6	26.2
37	2006	31.5	40.9	31.6	42.6	25.0	29.8
38	2007	33.1	29.6	34.6	22.2	28.4	20.4
39	2008	22.4	22.6	43.9	33.4	28.8	30.8
40	2009	23.0	25.0	25.3	20.0	29.4	24.9
41	2010	33.4	20.8	20.6	25.0	37.6	33.4
42	2011	31.8	32.4	32.2	35.8	42.8	30.5
43	2012	22.1	24.0	27.4	37.9	32.6	29.9
44	2013	15.7	22.0	44.1	32.0	38.6	32.0
45	2014	24.9	23.0	27.4	32.3	41.4	34.2
46	2015	17.8	27.6	30.2	29.8	33.8	43.2
47	2016	22.1	28.1	49.8	26.6	38.0	27.5
48	2017	38.5	21.8	27.4	21.2	21.4	24.7
49	2018	32.5	30.2	30.5	31.0	17.6	28.0
50	2019	31.9	39.4	42.0	31.4	30.0	28.5
51	2020	26.7	19.7	40.5	44.2	26.2	29.4
52	2021	25.5	60.9	33.0	29.4	40.4	29.8
53	2022	27.8	31.8	29.6	21.0	38.0	27.0
Numero de datos n		53	53	53	53	53	53
Suma Σ		1148.0	1690.6	2005.5	1327.1	1602.3	1737.7
Máximo		38.5	68.9	68.7	47.2	44.6	52.2
Mínimo		11.6	19.2	20.6	12.9	17.4	16.7
Promedio \bar{x}		21.7	31.9	37.8	25.0	30.2	32.8
Desviación estándar s		6.82	10.80	10.18	8.30	7.51	7.23
Coef. asimetría Cs		0.66	1.63	0.65	0.89	0.13	0.51
PRUEBA DE DATOS DUDOSOS (Método Water Resources Council)							
P. max. Aceptada		48.99	70.15	77.49	58.17	60.27	59.58
P. min. Aceptada		8.72	13.21	17.22	9.74	14.23	16.20

4.1.4. Selección de las distribuciones de probabilidad

Mediante la aplicación de la prueba de Kolmogórov-Smirnov, se sometieron las distribuciones de la Normal, Gumbel, LogNormal, Pearson III y Log Pearson III a un riguroso análisis. Este proceso permitió la determinación de los valores del estadístico de prueba "D" para las precipitaciones máximas. Al comparar el valor obtenido de "D" con el valor crítico, se evaluó la significancia estadística del ajuste de cada distribución. Es crucial destacar que, si el valor de

"D" resulta ser menor que el valor crítico, se llega a la conclusión de que la distribución seleccionada se ajusta de manera efectiva a los datos observados de precipitación máxima. El resumen de los resultados de este análisis se detalla en la tabla 16, proporcionando una visión clara de la capacidad de ajuste de cada distribución en cada estación, lo que contribuye significativamente al entendimiento de la idoneidad de los modelos propuestos en el contexto específico de las precipitaciones máximas.

Tabla 16

Prueba Kolmogórov-Smirnov – Delta Calculado

Estación	Normal	Log - Normal	Pearson III	Log Pearson III	GEV I	Mejor Ajuste por estación
ANANEA	0.1188 (5)	0.0823 (3)	0.0822 (2)	0.0821 (1)	0.0879 (4)	Log Pearson III
COJATA	0.1472 (5)	0.0972 (4)	0.0689 (1)	0.0783 (2)	0.0844 (3)	Pearson III
HUANCANE	0.0717 (5)	0.0342 (1)	0.041 (2)	0.0432 (3)	0.0505 (4)	Log-Normal
MUÑANI	0.1567 (5)	0.0979 (3)	0.0996 (4)	0.0849 (1)	0.0913 (2)	Log Pearson III
PROGRESO	0.0969 (4)	0.0955 (3)	0.0952 (2)	0.0941 (1)	0.1157 (5)	Log Pearson III
PUTINA	0.1144 (5)	0.0783 (1)	0.0825 (3)	0.0849 (4)	0.0819 (2)	Log-Normal

Nota: En la tabla se aprecia el valor del estadístico de prueba D, en cada una de las estaciones para cada serie y distribución, donde el paréntesis (*), indica el orden en que mejor se ajustan en cada estación.

De la tabla de resultados, se aprecia que para la estación Ananea, Muñani y Progreso, la distribución Log Pearson III tiene un mejor ajuste en ellas, mientras tanto en la estación Cojata la distribución Pearson III tiene un mejor ajuste y por último la distribución Log-Normal es la que mejor se ajusta a la estación Putina.

4.1.5. Precipitaciones máximas anuales en 24 horas

De las distribuciones que mejor se ajustan en cada serie histórica, se determinaron las precipitaciones máximas anuales para cada periodo de retorno, y a estas se les incremento con el coeficiente de corrección (1.13) de Pmax de la

OMM, con resultados mostrados en el margen derecho de la tabla 17. De igual forma en el extremo izquierdo de la tabla se presentan los valores de precipitación máxima, del estudio desarrollado por la ANA en la cuenca Huancané y Suches.

Tabla 17

Comparación de precipitaciones máximas anuales por estación

T (años)	Ananea		Cojata		Huancané		Muñani		Progreso		Putina	
	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA	P _{MAX} (mm) ANA 2010	PMAX (mm) OBTENIDA
5	24.00	30.19	39.10	44.15	48.40	51.75	35.50	35.06	-	41.23	41.30	43.60
10	27.30	34.83	44.80	52.08	55.20	58.24	40.40	40.73	-	45.63	47.00	48.07
20	30.40	39.28	50.30	59.86	61.60	64.21	45.10	46.25	-	49.45	52.50	52.11
50	34.50	45.10	57.40	70.06	70.00	71.66	51.10	53.55	-	53.94	59.50	57.05
100	37.60	49.53	62.80	77.76	76.30	77.11	55.70	59.17	-	57.03	64.90	60.61
200	40.60	54.02	68.10	85.49	82.50	82.45	60.20	64.92	-	59.93	70.10	64.06
500	44.60	60.09	75.10	95.76	90.70	89.42	66.20	72.78	-	63.53	77.10	68.50
1000	47.70	64.81	80.40	103.58	97.00	94.66	70.70	78.95	-	66.11	82.40	71.80

Nota: Los datos de precipitación máxima en el margen izquierdo de cada estación fueron extraídos de (ANA, 2010), y los del extremo derecho fueron los calculados en la presente investigación.

Cabe resaltar que las precipitaciones máximas obtenidas por la ANA fueron del periodo de estudio de 1956 al 2009, mientras que el periodo de la presente investigación se encuentra entre 1970 al 2022, de la tabla se aprecia que en la estación Ananea (4640 msnm), Coajata (4327 msnm), y Muñani (3948 msnm) muestran un incremento en las precipitaciones máximas, para cada periodo de retorno, mientras que la estación Huancané (3840 msnm) y Putina (3856 msnm), para los periodos de retorno mayor a 100 años las precipitaciones se reducen en comparación al estudio realizado por la ANA en la cuenca Huancané.

4.1.6. Hietogramas por curvas IDF para diferentes periodos de retorno

Para nuestro estudio se estimó un evento de 12 horas asumiendo que este periodo de tormentas no es ajeno a la región de Puno, las selecciones de la frecuencia de retorno resultantes son para 50, 100 y 200 años, las mismas que se aprecian en el Anexo E.

Figura 20

Hietogramas para periodo de retorno de 50 años

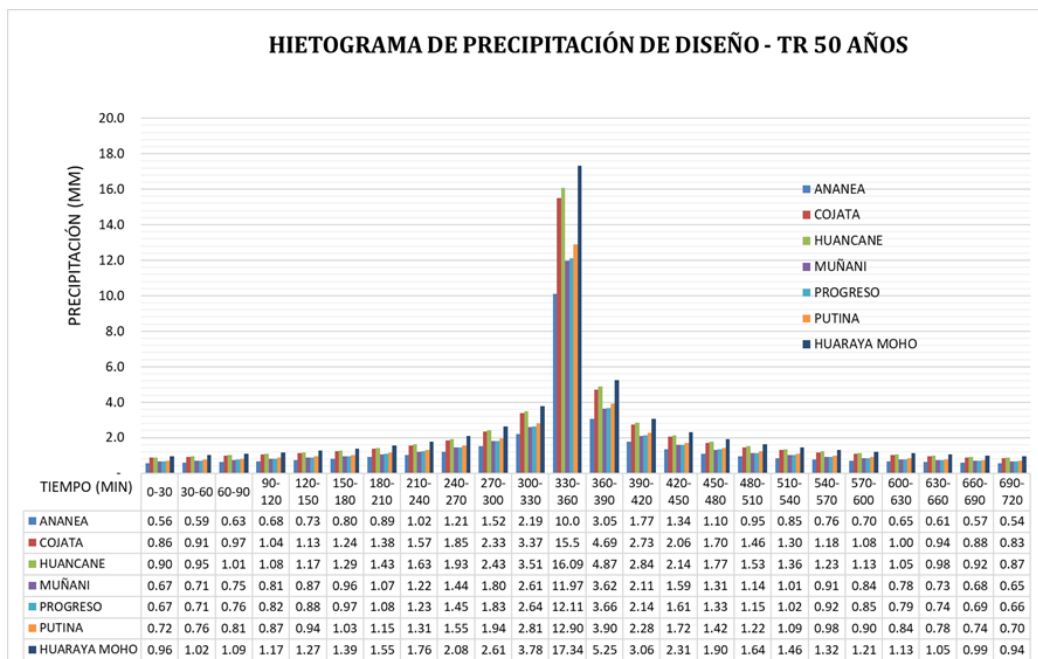


Figura 21

Hietogramas para periodo de retorno de 100 años

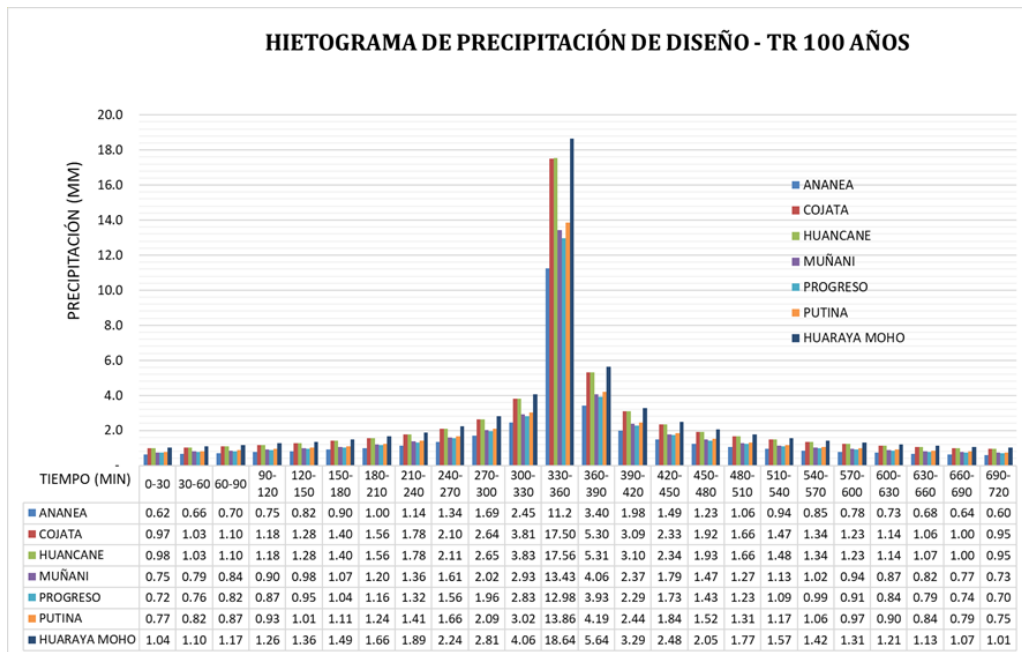
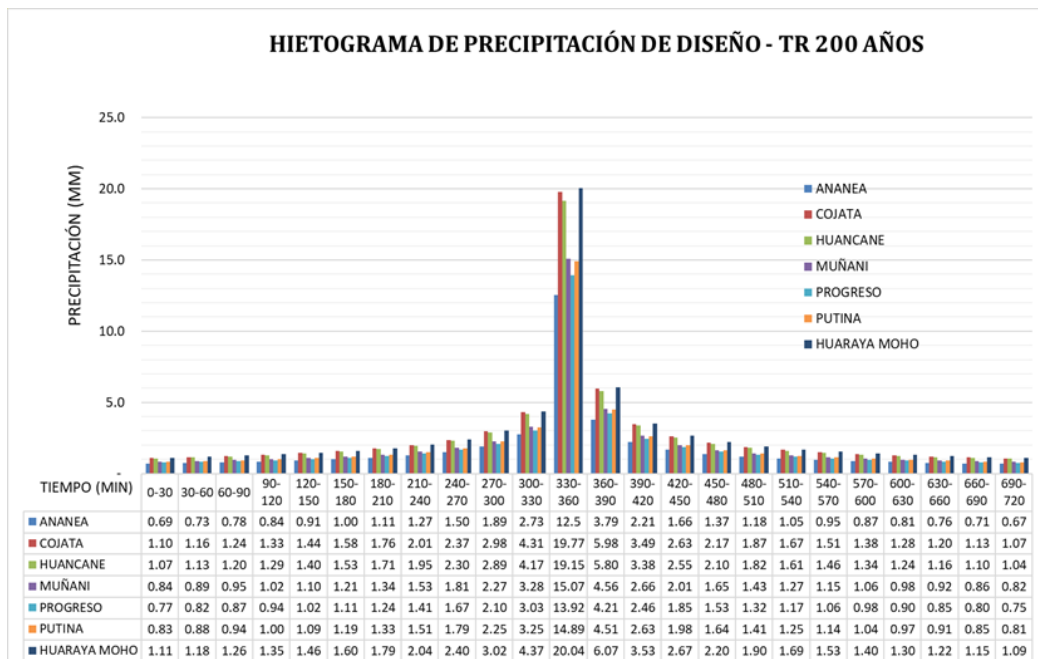


Figura 22

Hietogramas para periodo de retorno de 200 años





4.1.7. Modelo hidrológico HEC HMS

Al procesar inicialmente la cuenca utilizando la herramienta GIS integrada en HEC-HMS, se generó las características detalladas de las subcuencas. Este cuadro incluyó información clave como el área de drenaje, la pendiente media, la longitud del cauce principal y otros parámetros geomorfológicos esenciales para el modelado hidrológico de cada subcuenca como se detallan a continuación:

Tabla 18

Características geomorfológicas de las subcuencas en el modelo HEC HMS

CUENCA	SUBCUE	UH	AREA (km ²)	NC	Longest Flowpath Length (KM)	Longest Flowpath Slope (M/M)	Centroidal Flowpath Length (KM)	Centroidal Flowpath Slope (M/M)	Relief Ratio	Elongation Ratio	Drainage Density (KM/KM ²)	tc (hec hms)	t lag (hr)
HUANCANE	PUTINA	UH 1789	505.78	74.00	47.57104	0.02363	28.87051	0.00887	0.02527	0.53345	0.05625	7.32	4.39
		UH 1788	395.42	74.71	53.90253	0.01952	16.44769	0.00122	0.02004	0.41627	0.04191	6.77	4.06
		UH 1786	887.12	73.64	76.26046	0.01298	41.05911	0.00482	0.01587	0.4407	0.06278	10.20	6.15
		UH 1787	36.47	74.00	13.46911	0.01544	5.20487	0.00058	0.03237	0.50595	0.26085	3.56	2.13
		UH 1785	15.55	72.52	9.26258	0.03779	3.58312	0.00195	0.03779	0.48032	0.19891	2.42	1.45
		UH 1784	1170.3	79.80	97.8762	0.00615	57.24915	0.00176	0.01159	0.39438	0.0719	14.00	8.38
		UH 1782	532.7	72.40	68.35002	0.00983	24.412	0.00045	0.01428	0.38103	0.10841	11.00	6.62

Nota: De la tabla, las unidades hidrográficas UH 1785, UH 1784 y UH 1782 son alternas al estudio realizado por ANA, con fines de validación del modelo hidrológico en la cuenca Huancané

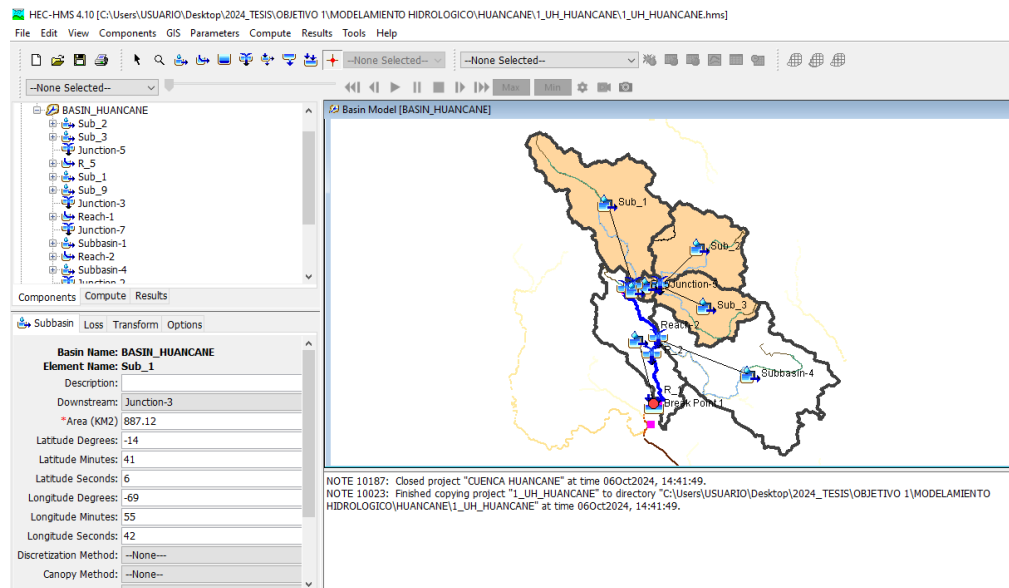
Tabla 19

Características geomorfológicas de los ríos en el modelo HEC HMS

REACH	LENGTH (KM)	SLOPE (M/M)	RELIEF (M)	SINUOSITY	tc (min)	lag(min)	K (hr)	subreaches	X	ANCHO
R_5	9.52	0.000950	9.00	1.23	328.87	197.32	5.48	11.00	0.32-0.39	18.00
R_4	3.09	0.002260	7.00	1.30	99.10	59.46	1.65	3.00	0.32-0.34	30.00
R_3	23.46	0.000510	12.00	1.36	836.85	502.11	13.95	28.00	0.35-0.44	35.00
R_2	7.39	0.001350	10.00	1.41	236.34	141.81	3.94	8.00	0.35-0.40	45.00
R_1	22.51	0.000490	11.00	1.57	823.11	493.87	13.72	27.00	0.33-0.43	50.00

Figura 23

Delimitación de cuenca Huancané y sub cuenca Putina en HEC HMS



4.1.8. Caudales máximos

Dado que no se disponía de datos observados de caudales, se realizó inicialmente una simulación utilizando un periodo de retorno de 100 años. Para ello, se emplearon tres métodos de transformación de precipitación a escorrentía, con el propósito de comparar los resultados obtenidos en el punto de control de la cuenca Huancané. Como se muestra en la figura 23, los caudales simulados fueron contrastados con los datos observados del río Huancané. Además, el modelo HEC HMS permitió generar los caudales correspondientes para la subcuenca del río Putina y sus respectivas unidades hidrográficas, proporcionando una visión más detallada del comportamiento hidrológico de cada área

Tabla 20

*Caudales obtenidos bajo diferentes métodos de transformación, precipitación -
escorrentía (m³/s), para un periodo de retorno de 100 años*

CUENCA	SUBCUENCA	UH	METODO DE TRANSFORMACION		
			SCS	SNYDER	CRARK
HUANCANE	PUTINA	UH 1789	89.4	68.2	51.1
		UH 1788	167.2	119.6	74.9
		UH 1787	14.8	11.6	7.2
		UH 1786	196.9	141.1	82.5
		UH 1785	6.7	5	3.3
	UH 1784	612	460.4	232.6	
	UH 1782	146	122.7	59.7	

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de los tres métodos de transformación de precipitación a escorrentía (SCS, Snyder y Clark) para la cuenca Huancané y la subcuenca Putina, en un periodo de retorno de 100 años, muestran variaciones significativas en los caudales simulados, lo que resalta la influencia de las características propias de cada método en la estimación hidrológica.

En el caso del método SCS, se obtuvo un caudal de 582.80 m³/s para la cuenca Huancané y de 419.20 m³/s para la subcuenca Putina. Este método, conocido por su simplicidad y su enfoque empírico basado en el uso del número de curva, presenta los valores más altos de escorrentía simulada, lo que podría explicarse por la sensibilidad de este método a las condiciones de humedad del suelo y la capacidad de retención.

Por otro lado, el método de Snyder arrojó un caudal de 453.30 m³/s para la cuenca Huancané y 310.10 m³/s para la subcuenca Putina. Este método, que se basa en parámetros empíricos ajustados a las características geomorfológicas de la cuenca, produjo estimaciones de caudal más moderadas en comparación con el



método SCS. La menor sensibilidad del método de Snyder a las variaciones del terreno puede ser la causa de estas diferencias.

Finalmente, el método de Clark estimó los caudales más bajos, con un valor de 349.20 m³/s para la cuenca Huancané y 198.40 m³/s para la subcuenca Putina. Este resultado puede estar relacionado con la capacidad del método de Clark para representar de manera más precisa el almacenamiento de agua en la cuenca y los tiempos de concentración, lo que tiende a suavizar la escorrentía generada.

Comparativamente, el método SCS presenta los caudales más elevados, lo que podría ser una sobreestimación en escenarios de suelos con alta capacidad de infiltración. El método de Snyder se sitúa en un rango intermedio, siendo adecuado para cuencas con características homogéneas. Por su parte, el método de Clark proporciona las estimaciones más conservadoras, posiblemente por su enfoque en la distribución temporal y espacial de la escorrentía. La elección del método más adecuado se establecerá de acuerdo a los caudales observados en la cuenca Huancané como se detalla en adelante.

4.1.9. Análisis de caudales máximos observados en la cuenca Huancané

La metodología empleada para el cálculo de caudales máximos con periodos de retorno en el río Huancané, será la misma que se presenta en el estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches realizado por la ANA, los datos empleados fueron recolectados del SENAMHI en el periodo de 1970 a 2022, y al ser estos caudales máximos promedios diarios, se aplica el método de Fuller, convirtiéndolos en caudales máximos instantáneos, con la siguiente ecuación:



$$Q_{inst} = Q_{max} \left(1 + \frac{2.66}{A^{0.3}} \right)$$

Donde:

Q_{inst} : Caudal máximo instantáneo (m³/s)

Q_{max} : Caudal máximo medio diario (m³/s)

A : Área de la cuenca de interés (km²)

Considerando que el área de la cuenca Huancané es de 3511.10 km², la ecuación se resume a:

$$Q_{inst} = 1.23 Q_{max}$$

Dando como valores los siguientes caudales:

Tabla 21

Caudales máximos observados en la cuenca Huancané

Nro	Año	Q_{max}	Q_{inst}
1	1970	155.00	190.65
2	1971	364.00	447.72
3	1972	93.40	114.88
4	1973	145.40	178.84
5	1974	210.50	258.92
6	1975	163.00	200.49
7	1976	111.20	136.78
8	1977	132.08	162.46
9	1978	130.42	160.42
10	1979	243.92	300.02
11	1980	89.57	110.17
12	1981	170.12	209.25
13	1982	159.05	195.63
14	1983	64.00	78.72
15	1984	179.20	220.42
16	1985	149.00	183.27
17	1986	212.00	260.76
18	1987	141.60	174.17



Nro	Año	Q_{max}	Q_{inst}
19	1988	155.00	190.65
20	1989	79.52	97.81
21	1990	45.78	56.31
22	1991	66.83	82.20
23	1992	56.58	69.59
24	1993	128.47	158.02
25	1994	203.32	250.08
26	1995	109.30	134.44
27	1996	98.77	121.49
28	1997	200.02	246.02
29	1998	102.70	126.32
30	1999	228.58	281.15
31	2000	285.74	351.46
32	2001	216.71	266.55
33	2002	163.89	201.58
34	2003	281.83	346.65
35	2004	230.50	283.52
36	2005	166.84	205.21
37	2006	207.82	255.62
38	2007	145.63	179.12
39	2008	98.79	121.51
40	2009	66.85	82.22
41	2010	136.31	167.66
42	2011	93.04	114.44
43	2012	199.20	245.01
44	2013	260.96	320.97
45	2014	117.64	144.70
46	2015	122.83	151.08
47	2016	368.59	453.37
48	2017	43.98	54.10
49	2018	138.58	170.45
50	2019	117.12	144.06
51	2020	148.32	182.43
52	2021	153.83	189.21
53	2022	160.29	197.16

Después de calcular los caudales máximos instantáneos, se llevó a cabo un análisis de frecuencia para identificar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y, al mismo tiempo, estimar la magnitud del evento para un periodo de retorno específico, de donde la distribución Gumbel tuvo un mejor comportamiento.

Tabla 22

Distribuciones de probabilidad para cada periodo de retorno de caudales en la cuenca Huancané

T (años)	P(X≤x _T)	DISTRIB. NORMAL		DISTRIB. GUMBELL		DISTRIB. LOGNORMAL			DISTRIB. PEARSON III		DISTRIB. LOG PEARSON III			Q _{MAX} m ³ /s
		K _T	x _T	K _T	x _T	K _T	x _T	10 ^{x_T}	K _T	x _T	K _T	X _t	10 ^{x_T}	
		2	0.500	0.0000	192.9	-0.1643	178.4	0.00	2.239	173.7	-0.154	179.3	0.0679	
3	0.667	0.4307	231.0	0.2538	215.4	0.43	2.329	213.4	0.284	218.0	0.4821	2.339	218.7	215.36
5	0.800	0.8416	267.3	0.7195	256.5	0.84	2.414	259.6	0.759	260.1	0.8545	2.417	261.2	256.48
10	0.900	1.2816	306.1	1.3046	308.2	1.28	2.505	320.4	1.334	310.8	1.2293	2.494	312.5	308.16
20	0.950	1.6449	338.2	1.8658	357.7	1.64	2.581	381.1	1.864	357.6	1.5207	2.555	359.2	357.73
25	0.960	1.7507	347.6	2.0438	373.5	1.75	2.603	400.9	2.027	372.0	1.6026	2.572	373.5	373.46
50	0.980	2.0537	374.3	2.5923	421.9	2.05	2.665	463.4	2.521	415.6	1.8297	2.619	416.3	421.90
100	0.990	2.3263	398.4	3.1367	470.0	2.33	2.722	527.8	2.997	457.7	2.0248	2.659	457.0	469.98
200	0.995	2.5758	420.4	3.6791	517.9	2.58	2.774	594.7	3.461	498.7	2.1960	2.695	496.0	517.89
300	0.997	2.7131	432.6	3.9959	545.9	2.71	2.802	635.0	3.728	522.2	2.2871	2.714	518.0	545.87
500	0.998	2.8782	447.1	4.3947	581.1	2.88	2.837	687.1	4.060	551.5	2.3940	2.736	545.2	581.09
1000	0.999	3.0902	465.9	4.9355	628.9	3.09	2.881	760.4	4.504	590.8	2.5270	2.764	581.0	628.86

De la tabla se visualiza que el valor referencial de la cuenca Huancané para un periodo de retorno de 100 años es de 469.98 m³/s.

Una vez obtenidos los valores de caudales a partir de los diferentes métodos de transformación de precipitación a escorrentía (SCS, Snyder y Clark), se procedió a comparar este valor con los caudales simulados por los tres métodos, donde se observa lo siguiente:

El método de Snyder proporciona un caudal de 453.30 m³/s para la cuenca Huancané, lo que se encuentra muy próximo al caudal observado de 469.98 m³/s. Esta proximidad indica que el método de Snyder tiene una capacidad razonable para modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo condiciones de precipitación extrema.

El método SCS, que arrojó un caudal de 582.80 m³/s, sobreestima considerablemente los valores observados. Por otro lado, el método de Clark estimó un caudal de 349.20 m³/s, considerablemente inferior al caudal observado.

4.1.10. Caudales máximos en la subcuenca Putina

De lo analizado en el apartado 4.1.1.8, en resumen, el método de Snyder se ajusta mejor a los caudales observados para un periodo de retorno de 100 años, lo que lo convierte en la opción más adecuada para la modelación de la cuenca Huancané y por ende para la subcuenca Putina, la comparación con los datos históricos respalda la elección de este método para las siguientes simulaciones y análisis hidrológicos, al ofrecer un balance adecuado. Por lo tanto, se generaron los caudales de la subcuenca del río Putina, con ese método y son los que se detallan a continuación:

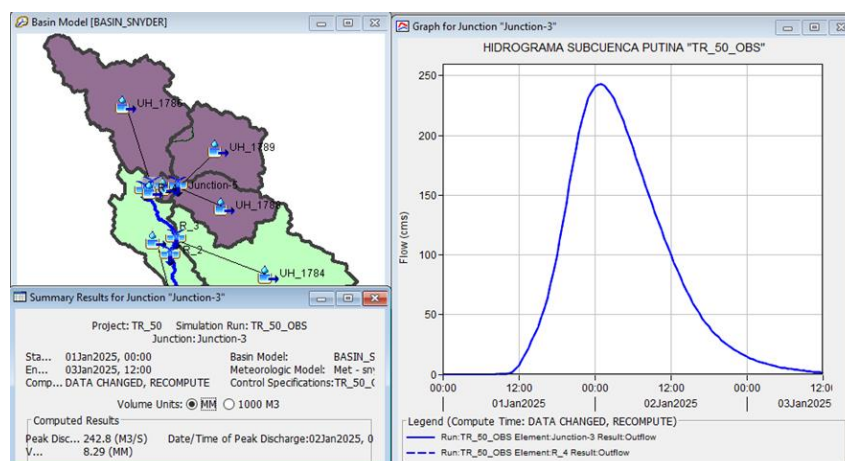
Tabla 23

Caudales obtenidos para la subcuenca Putina

UH	Caudales (m ³ /s)		
	Tr=50	Tr=100	Tr=200
1789	55.2	68.2	86.9
1788	96.5	119.5	147.5
1786	110.2	141.1	178.4
1787	9.4	11.6	14.3
1785	4	5	6.2
Putina	242.8	310.1	391.9

Figura 24

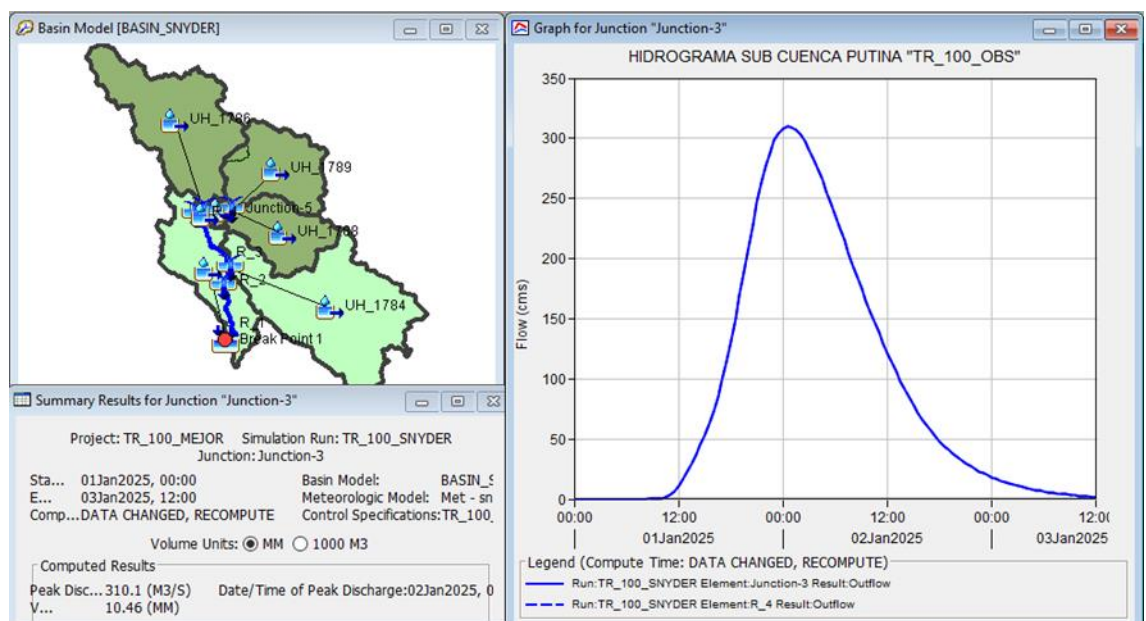
Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 50 años



Utilizando el método de Snyder, se obtuvo un caudal de 242.8 m³/s en el punto de delimitación de la subcuenca Putina para un periodo de retorno de 50 años. Además, se analizaron las contribuciones de las unidades hidrográficas dentro de la subcuenca, obteniendo los siguientes resultados: la UH 1789 presentó un caudal de 55.2 m³/s, la UH 1788 alcanzó 96.5 m³/s, y la UH 1786 registró el valor más alto con 110.2 m³/s. Estos resultados reflejan cómo cada unidad hidrográfica contribuye al caudal total en la subcuenca Putina, siendo la UH 1786 la mayor contribuyente. Este análisis proporciona información relevante para la validación del modelo hidrológico y una mejor comprensión de la distribución de escorrentía dentro de la cuenca

Figura 25

Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 100 años

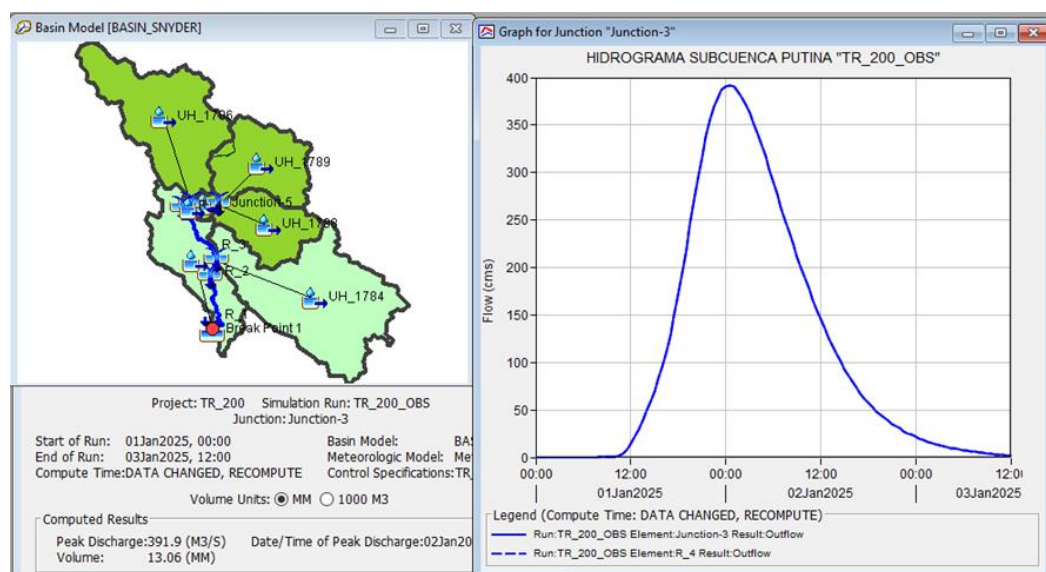


Para un periodo de retorno de 100 años, se obtuvo un caudal de 310,10 m³/s en el punto de delimitación de la subcuenca Putina. Al analizar las unidades hidrográficas, los caudales fueron los siguientes: la UH 1789 aportó 68.2 m³/s, la

UH 1788 contribuyó con 119.5 m³/s y la UH 1786 registró el caudal más alto, con 141.1 m³/s. Estos resultados muestran un aumento significativo en los caudales respecto al periodo de retorno de 50 años, reflejando cómo los eventos de mayor intensidad impactan proporcionalmente en cada unidad hidrográfica. La UH 1786 sigue siendo la mayor contribuyente al caudal total.

Figura 26

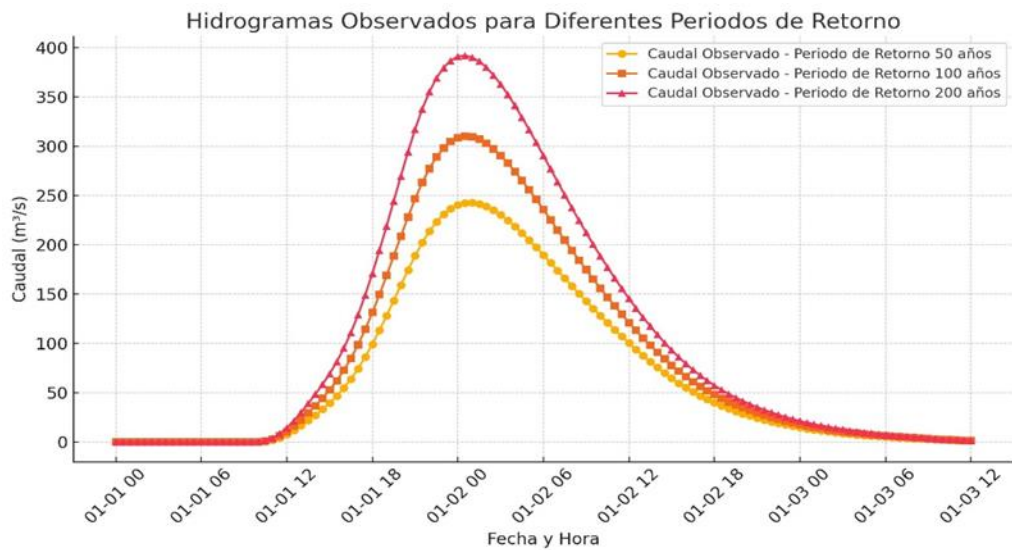
Resultados del modelo hidrológico en HEC HMS para un TR 200 años



Para el periodo de retorno de 200 años, el caudal estimado en el punto de delimitación de la subcuena del río Putina utilizando el método de Snyder fue de 391.9 m³/s. Las unidades hidrográficas contribuyeron con los siguientes valores: la UH 1789 con 86.9 m³/s, la UH 1788 con 147.5 m³/s, y la UH 1786, como en los periodos anteriores, presentó el mayor caudal con 178.4 m³/s. Estos resultados reflejan un incremento sustancial en los caudales a medida que aumenta el periodo de retorno, lo que evidencia la magnitud de las precipitaciones extremas sobre la subcuena.

Figura 27

Hidrogramas de salida



En los hidrogramas correspondientes a los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años se observa que el ancho de los hidrogramas, o la duración del caudal elevado, también aumenta a medida que se extiende el periodo de retorno. Este comportamiento refleja la capacidad del modelo HEC-HMS para captar la relación entre la intensidad y la duración de la precipitación, donde eventos de lluvia más prolongados generan escorrentías más sostenidas en el tiempo. De la comparación entre Periodos de Retorno el hidrograma correspondiente al periodo de retorno de 50 años muestra una respuesta hidrológica más moderada, en cambio, el hidrograma del periodo de retorno de 200 años sugiere un riesgo mucho mayor de inundaciones y desbordes, debido tanto al caudal máximo como a la mayor cantidad de agua que fluye durante el evento.

Dado que estos resultados provienen de la simulación con HEC-HMS, es importante resaltar la validación de estos hidrogramas observados frente a datos reales de eventos históricos.



4.2. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DEL PROYECTO CMIP5 PARA OBTENER PROYECCIONES DE CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (RCP 4.5 Y RCP 8.5) EN LA SUBCUENCA

4.2.1. Recolección de datos

Descarga de datos de modelos climáticos globales

Los datos utilizados en este estudio provienen de simulaciones climáticas del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), obtenidas a través de la plataforma Climate Explorer. Se seleccionaron 18 modelos globales de circulación atmosférica (GCM) que simulan la variable precipitación bajo dos escenarios de emisiones representativos: el RCP 4.5 (mitigación moderada) y el RCP 8.5 (altas emisiones). Estos modelos abarcan un período histórico y futuro común de 1850 a 2100, para poder facilitar el procesamiento en el lenguaje de programación en R.

El formato NetCDF fue seleccionado para la descarga, debido a su capacidad para manejar datos climáticos multidimensionales, permitiendo la manipulación eficiente de las variables de interés. La variable "pr" (precipitación) fue seleccionada específicamente, ya que es clave para evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico. El análisis subsecuente se basará en estos datos para proyectar cambios futuros en la precipitación, aplicar corrección de sesgo y seleccionar el modelo con mejor desempeño para la región de estudio.

Los modelos seleccionados fueron los siguientes:

Tabla 24

Características de los modelos 18 GCMs empleados

Modelo	Institución/País	Componentes Principales	Resolución	Enfoque Principal
ACCESS1-0	Australia (Bureau of Meteorology, CSIRO)	Atmósfera-Océano	Media	Interacción atmósfera-oceano
BNU-ESM	China (Beijing Normal University)	Atmósfera, tierra, océano, ciclo del carbono	Baja	Ciclo del carbono, biogeoquímica
CCSM4	EEUU (NCAR)	Atmósfera, tierra, océano, hielo marino	Media	Variabilidad climática, clima regional
CESM1-BGC	EEUU (NCAR)	Biogeoquímica, ciclo del carbono	Media	Ciclos biogeoquímicos, retroalimentación del carbono
CNRM-CM5	Francia (Météo-France, CNRM)	Atmósfera-Océano	Media	Interacción atmósfera-oceano
CSIRO-Mk3-6-0	Australia (CSIRO)	Atmósfera, océano, hielo	Baja	Variabilidad climática estacional y anual
CanESM2	Canadá (CCCma)	Atmósfera, océano, ciclo del carbono	Media	Ciclo del carbono
IPSL-CM5A-LR	Francia (IPSL)	Atmósfera, océano, biosfera	Baja	Interacciones a largo plazo
IPSL-CM5A-MR	Francia (IPSL)	Atmósfera, océano, biosfera	Media	Interacciones a largo plazo
MIROC-ESM	Japón (AORI, JAMSTEC, NIES)	Atmósfera, océano, biogeoquímica	Baja	Química atmosférica avanzada
MIROC-ESM-CHEM	Japón (AORI, JAMSTEC, NIES)	Atmósfera, océano, biogeoquímica, química atmosférica	Baja	Concentraciones de aerosoles y gases
MIROC5	Japón (AORI, JAMSTEC, NIES)	Atmósfera-Océano	Alta	Alta resolución, clima monzónico
MPI-ESM-LR	Alemania (MPI)	Atmósfera, océano, ciclo del carbono	Baja	Ciclo de carbono, interacciones del sistema terrestre
MPI-ESM-MR	Alemania (MPI)	Atmósfera, océano, ciclo del carbono	Media	Ciclo de carbono, interacciones del sistema terrestre
MRI-CGCM3	Japón (MRI)	Atmósfera-Océano	Media	Monzones, interacción océano-atmósfera
NorESM1-M	Noruega (BCCR, UiB)	Atmósfera, aerosoles, gases de efecto invernadero	Media	Transporte de aerosoles, interacción atmósfera-biosfera
BCC-CSM1-1	China (Beijing Climate Center)	Atmósfera, océano, ciclo del carbono	Baja	Variabilidad interanual (ENSO)
INMCM4	Rusia (Institute of Numerical Mathematics)	Atmósfera, océano, ciclo hidrológico	Baja	Ciclo hidrológico, dinámica oceánica

- Descarga de datos pisco

Para extraer los datos correspondientes a la subcuenca, se utilizó una máscara geográfica basada en los límites de la cuenca, obtenida a partir de la

delimitación realizada en el objetivo I. La intersección de las coordenadas espaciales del producto PISCO con la geometría de la subcuenca permitió obtener un conjunto de celdas de precipitación que cubren toda el área de estudio.

Figura 28

Procesamiento de los límites de la cuenca, en lenguaje de programación R

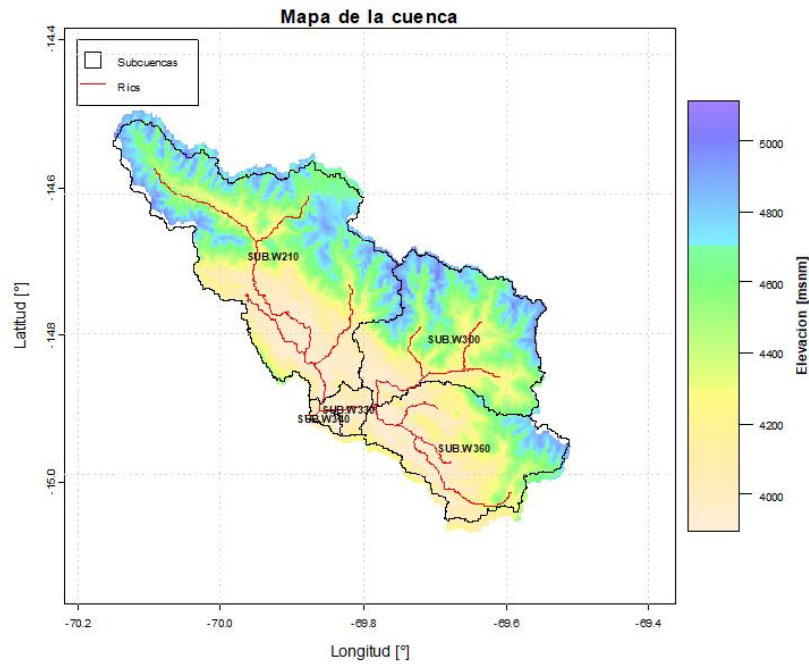
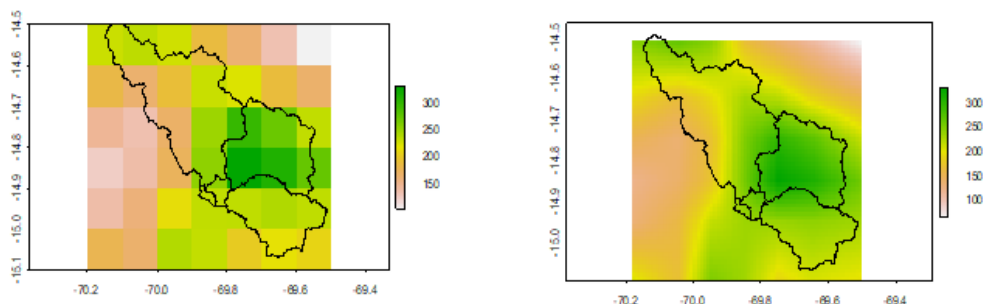


Figura 29

Precipitación observada de PISCO a nivel de subcuencas, imagen izquierda resolución de 5km x 5km, imagen derecha suavizado de resolución.

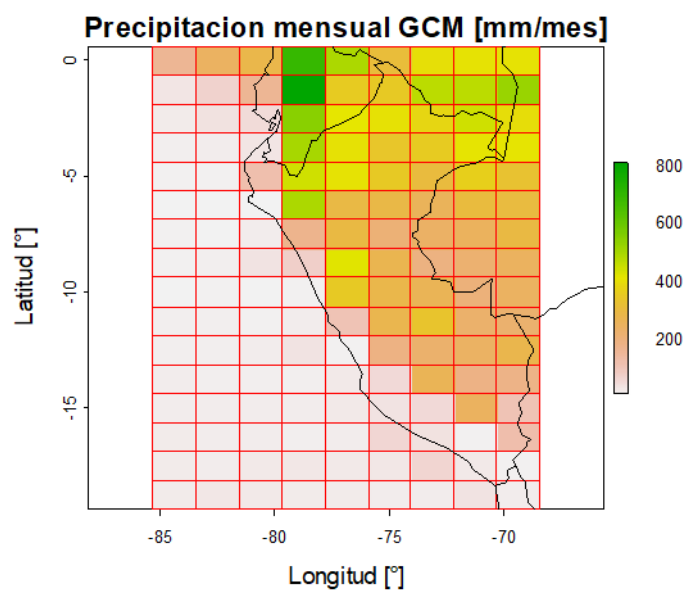


4.2.2. Post procesamiento de datos GCM

Para representar la precipitación en toda la subcuenca del río Putina, se promediaron los valores de precipitación de todas las celdas de PISCO dentro de los límites de la subcuenca. Este promedio se realizó mensualmente y luego se agrupó en valores anuales para facilitar el análisis. Los datos de precipitación mensual promediada fueron utilizados como insumo para comparar con las salidas de los modelos climáticos globales (GCM) durante el período de control (1981-2014)

Figura 30

Recorte y visualización de la descarga de GCM



El uso del lenguaje de programación R fue esencial en el manejo eficiente de grandes volúmenes de datos provenientes de 18 modelos climáticos. La integración de diferentes paquetes como ncd4, rgdal y raster permitió realizar el recorte espacial, la conversión de unidades y el suavizado de resolución de manera robusta. Este post-procesamiento asegura que los datos GCM sean comparables

con los datos observados locales (PISCO), lo que a su vez facilita el análisis de los cambios proyectados en la precipitación bajo distintos escenarios de cambio climático, tal como se muestra a continuación:

Figura 31

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01785

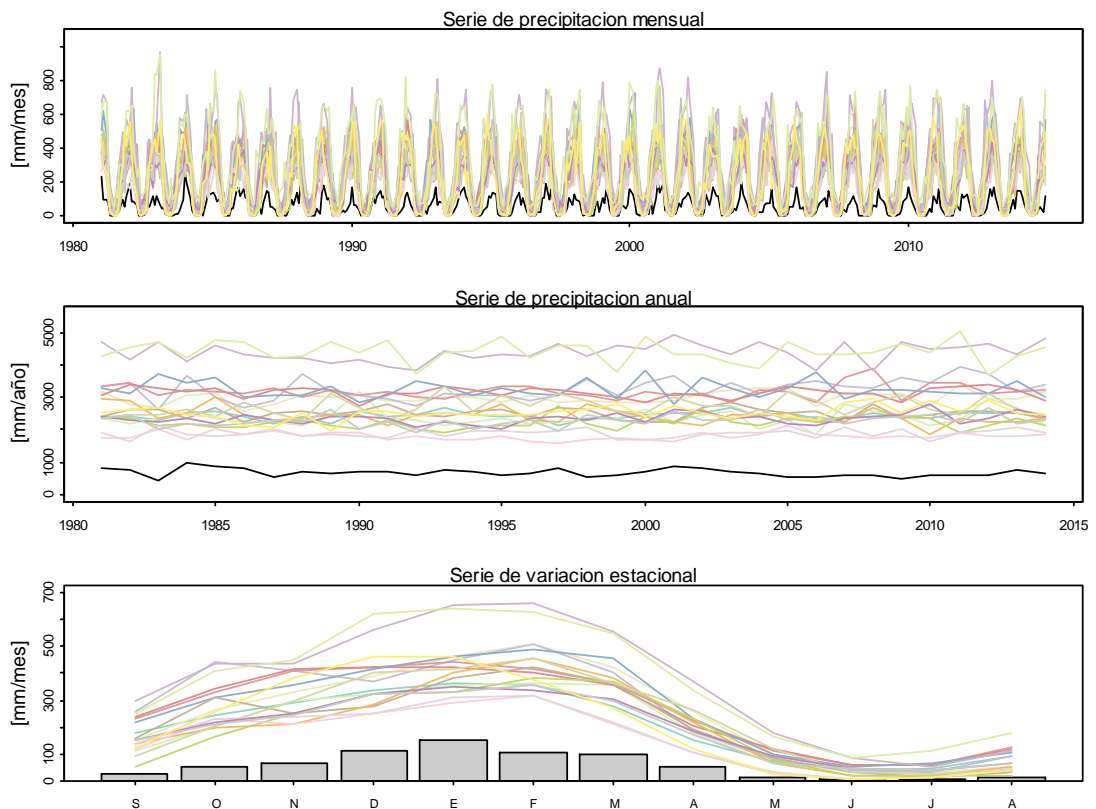


Figura 32

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01786

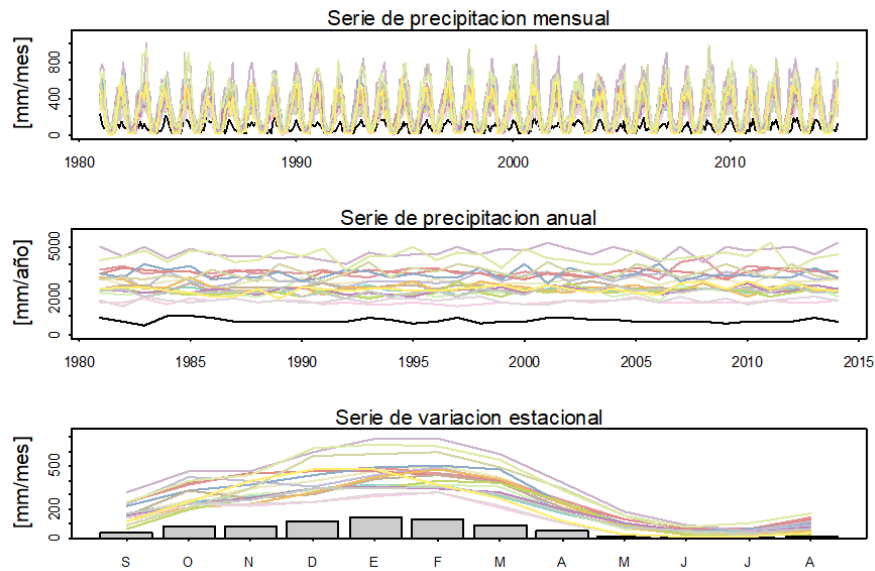


Figura 33

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01787

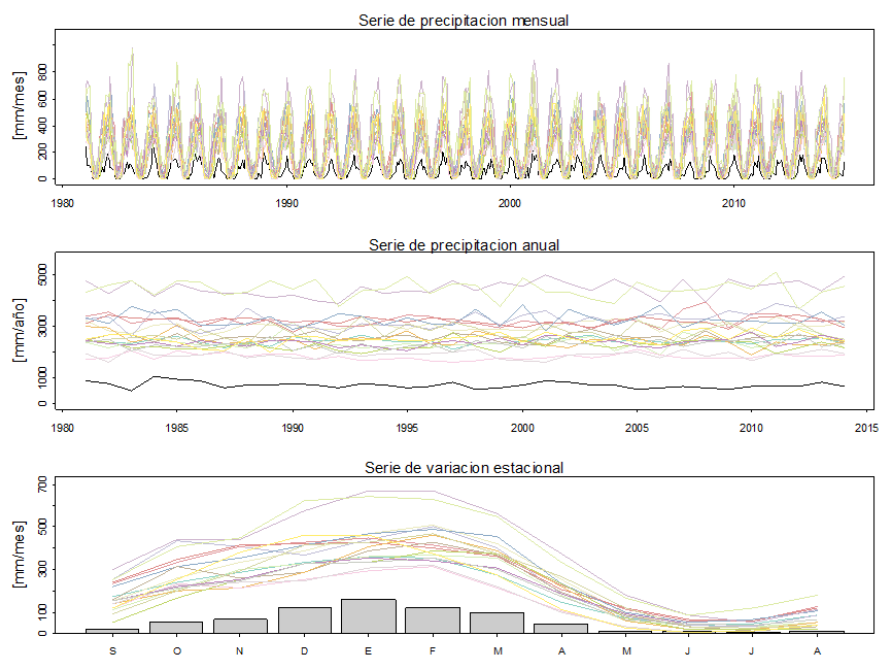


Figura 34

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01788

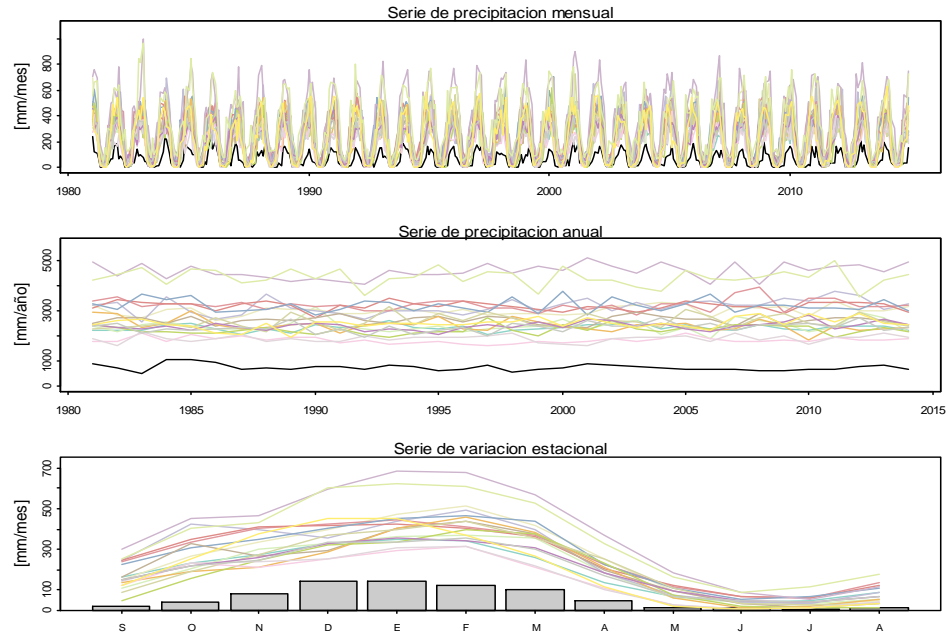
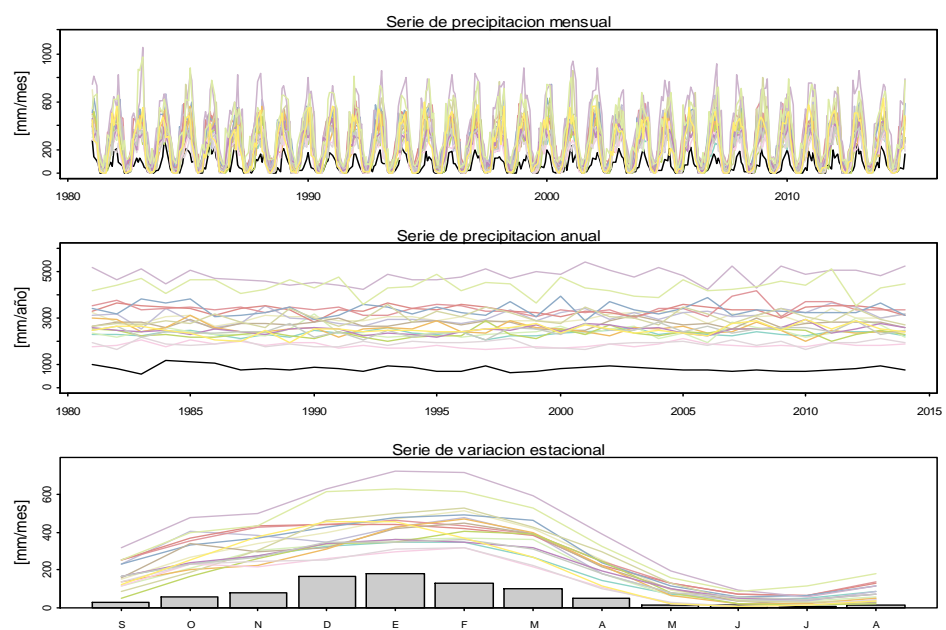


Figura 35

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (sin corregir), en la UH 01789





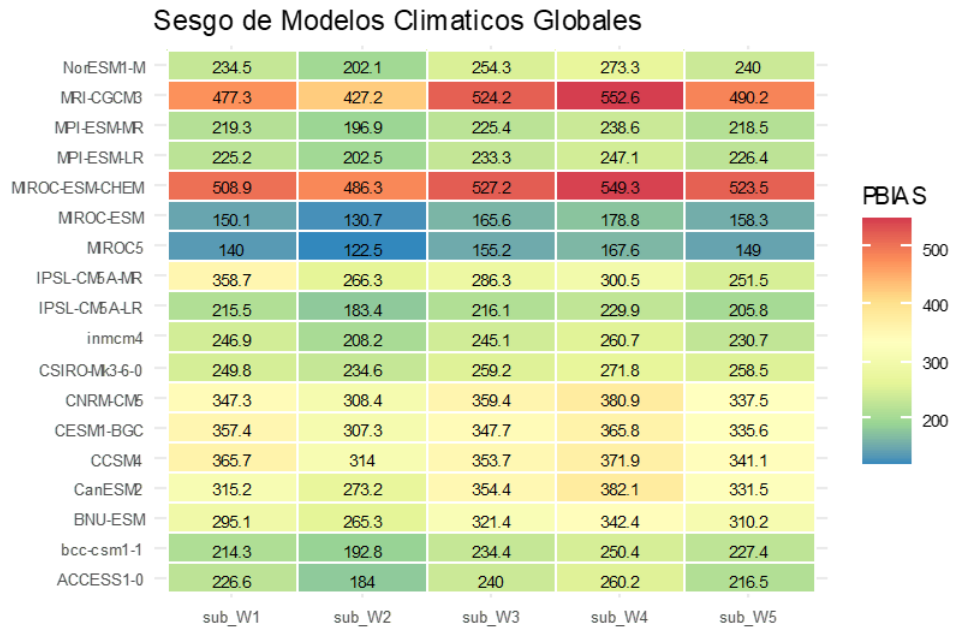
De las gráficas, de las series de precipitación mensual y anual, la línea negra representa la data observada de PISCO, mientras que las líneas de colores representan cada uno de los GCM's. A nivel anual se aprecia que los datos observados están sobreestimando, y al nivel mensual se observa que los modelos representan la estacionalidad, debido a que se observa que llueven en los periodos lluviosos, viéndose más detalladamente en la serie de variación estacional.

4.2.3. Selección del modelo

De la evaluación preliminar, siendo las tasas de precipitación variados para cada subcuencas, se calculó el PBIAS, (Percent BIAS o sesgo Porcentual), siendo más útil cuando se desea una métrica comparativa y adimensional para comparar el desempeño de la variable precipitación en los modelos climáticos, para ver si los datos están siendo subestimados o sobreestimados en porcentaje, posteriormente para asegurar que las proyecciones obtenidas sean representativas y precisas en comparación con datos observados, se calcularon las demás diferentes métricas estadísticas como el Error Medio Absoluto (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el Sesgo (BIAS), el Coeficiente de Correlación de Pearson (r), el Índice de Concordancia de Willmott (d) y la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Figura 36

Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación - Mapa de calor de PBIAS donde W1: UH 1786; W2:UH1789; W3:1787; W4: 1785; W5:1788.



Del mapa de calor en el periodo de control, según la estacionalidad, los modelos que mejor resultados ofrecen son MIROC5, MIROC-ESM, bbc-csm 1-1 y ACCESS 1-0.

- Análisis de las Métricas:

Para cerciorarse y garantizar una mejor elección, se ha calculado las métricas de MAE, RMSE, BIAS, r, d y NSE para cada uno de los 18 modelos climáticos respecto a los datos observados. A continuación, se interpreta cada una de las métricas con base en los resultados:

Tabla 25*Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1785*

Model	MAE	RMSE	BIAS	Pearson_r	d_index	NSE
ACCESS1-0	147.02	171.17	146.69	0.78	0.47	-9.02
bcc-csm1-1	141.82	178.33	141.15	0.75	0.46	-9.88
BNU-ESM	193.37	239.12	193.04	0.78	0.38	-18.56
CanESM2	215.64	266.40	215.41	0.68	0.33	-23.28
CCSM4	209.78	241.70	209.65	0.74	0.36	-18.99
CESM1-BGC	206.45	237.19	206.25	0.72	0.36	-18.25
CNRM-CM5	215.00	253.71	214.75	0.76	0.35	-21.02
CSIRO-Mk3-6-0	153.83	192.41	153.26	0.73	0.43	-11.67
inmcm4	147.87	189.07	146.99	0.78	0.45	-11.23
IPSL-CM5A-LR	131.28	173.76	129.63	0.75	0.47	-9.33
IPSL-CM5A-MR	170.23	217.04	169.44	0.75	0.40	-15.12
MIROC5	97.28	126.47	94.49	0.75	0.57	-4.47
MIROC-ESM	103.06	134.90	100.79	0.72	0.54	-5.23
MIROC-ESM-CHEM	309.82	363.17	309.67	0.76	0.27	-44.13
MPI-ESM-LR	139.74	163.38	139.34	0.80	0.49	-8.13
MPI-ESM-MR	134.82	161.30	134.53	0.77	0.48	-7.90
MRI-CGCM3	311.54	360.00	311.54	0.75	0.27	-43.34
NorESM1-M	155.65	213.45	154.09	0.74	0.42	-14.59

Los resultados para UH 1785, se puede apreciar que el modelo MIROC5, cuenta con el menor MAE y RMSE es el más preciso en términos de magnitud de error. Por otra parte, tiene un BIAS de 94.49 que es bajo en el sesgo el cual indica que no hay una tendencia sistemática a subestimar o sobreestimar. Así mismo la correlación de Pearson (r), el índice de concordancia de Willmott (d) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), en comparación con los demás modelos, indica una buena capacidad del modelo para predecir los valores observados.

Figura 37

Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1785

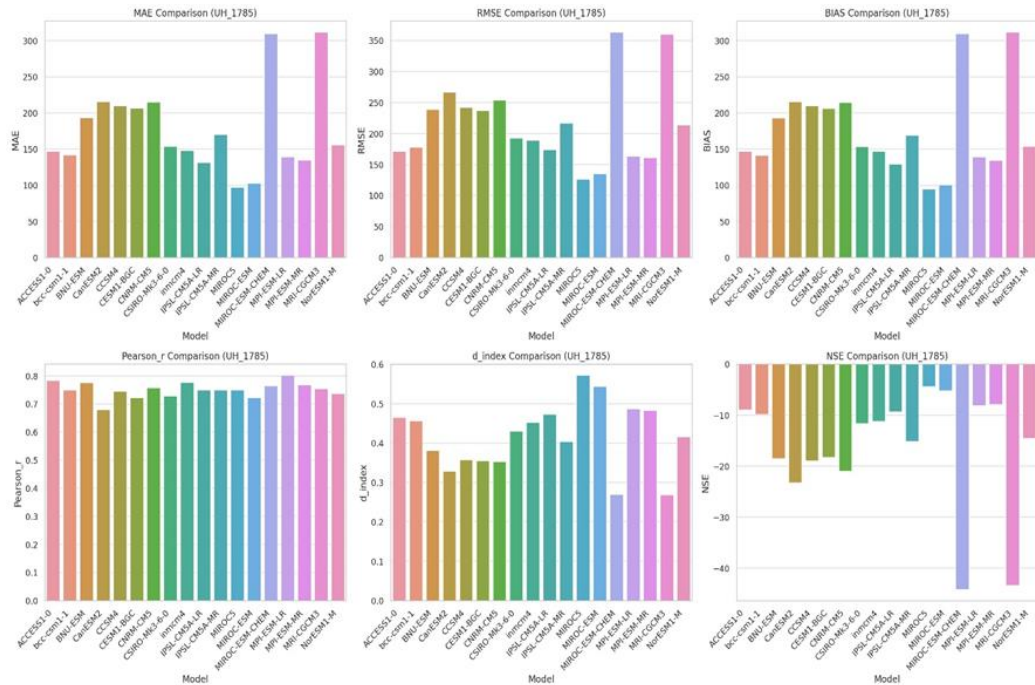
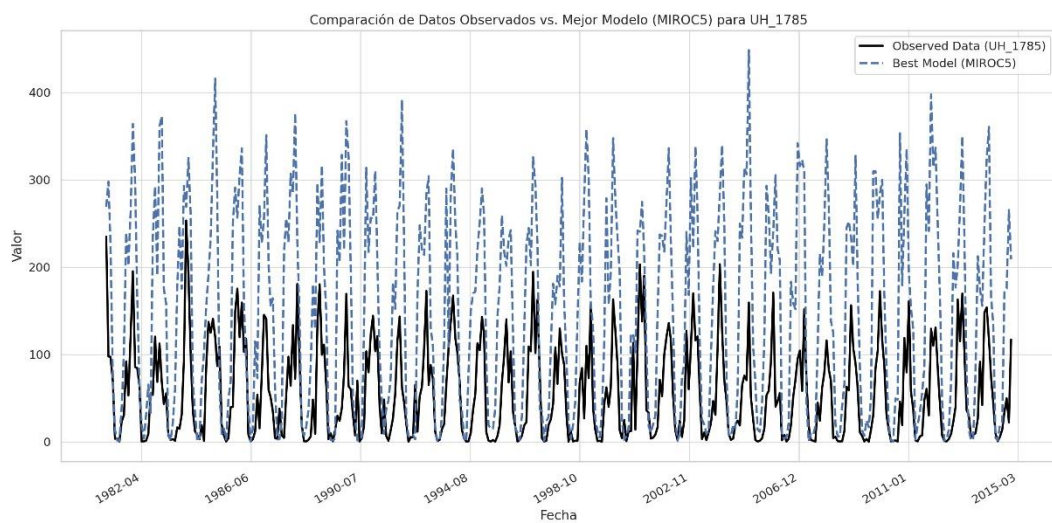


Figura 38

Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1785



De la gráfica el mejor modelo para UH_1785 es el modelo MIROC 5, este modelo se destaca por capturar la variabilidad de los datos observados con una alta eficiencia y precisión, minimizando errores (RMSE bajo) y manteniendo un ajuste sin sesgo significativo (BIAS cercano a cero). El valor de NSE es el más alto, lo que implica que el modelo es capaz de predecir valores que se ajustan mejor

Tabla 26

Resultados de métricas de evaluación de GCM para UH 1786

Model	MAE	RMSE	BIAS	Pearson_r	d_index	NSE
ACCESS1-0	143.66	166.90	143.40	0.83	0.49	-8.38
bcc-csm1-1	136.53	173.44	135.61	0.76	0.47	-9.13
BNU-ESM	187.23	233.08	186.75	0.80	0.40	-17.30
CanESM2	199.87	247.27	199.47	0.73	0.36	-19.60
CCSM4	231.38	266.74	231.38	0.78	0.34	-22.97
CESM1-BGC	226.16	259.36	226.15	0.77	0.34	-21.66
CNRM-CM5	220.05	262.79	219.79	0.78	0.35	-22.26
CSIRO-Mk3-6-0	158.72	198.14	158.05	0.77	0.44	-12.23
inmcm4	157.19	200.54	156.21	0.79	0.44	-12.55
IPSL-CM5A-LR	138.85	183.22	136.35	0.76	0.46	-10.31
IPSL-CM5A-MR	228.13	299.73	226.97	0.78	0.33	-29.27
MIROC5	92.30	120.36	88.56	0.79	0.61	-3.88
MIROC-ESM	97.99	128.80	94.96	0.77	0.58	-4.59
MIROC-ESM-CHEM	322.25	379.15	322.05	0.79	0.27	-47.43
MPI-ESM-LR	142.91	166.57	142.52	0.82	0.49	-8.35
MPI-ESM-MR	139.14	165.26	138.78	0.79	0.48	-8.20
MRI-CGCM3	302.09	353.08	302.05	0.78	0.28	-41.00
NorESM1-M	150.77	210.72	148.41	0.77	0.43	-13.96

En la tabla, el modelo MIROC5 presenta un NSE de -3.88 superior a los demás modelos, lo que sugiere que captura con mayor precisión la variabilidad observada en los datos. Además, cuentan con el MAE y RMSE más bajos indican que este modelo comete menos errores absolutos y relativos en comparación con los otros modelos.

De la figura, en la comparación gráfica entre los valores observados y los predichos por el mejor modelo, se observa un ajuste adecuado a lo largo del tiempo es el del Modelo MIROC5, capturando las tendencias generales y los picos de los datos observados.

Tabla 27

Resultados de métricas de evaluación de GCM para UH 1787

Model	MAE	RMSE	BIAS	Pearson_r	d_index	NSE
ACCESS1-0	142.59	165.80	142.10	0.79	0.50	-7.35
bcc-csm1-1	139.76	175.58	138.82	0.75	0.48	-8.36
BNU-ESM	190.87	235.71	190.32	0.78	0.40	-15.87
CanESM2	210.26	259.84	209.87	0.68	0.35	-19.50
CCSM4	209.67	241.18	209.47	0.74	0.37	-16.66
CESM1-BGC	206.15	236.66	205.91	0.72	0.37	-16.01
CNRM-CM5	213.17	250.97	212.83	0.76	0.37	-18.12
CSIRO-Mk3-6-0	154.30	192.78	153.46	0.73	0.45	-10.28
inmcm4	146.31	186.65	145.14	0.78	0.48	-9.58
IPSL-CM5A-LR	129.83	171.96	127.94	0.75	0.50	-7.98
IPSL-CM5A-MR	170.51	217.43	169.56	0.76	0.43	-13.35
MIROC5	95.03	123.71	91.89	0.75	0.60	-3.65
MIROC-ESM	100.84	132.11	98.07	0.72	0.57	-4.30
MIROC-ESM-CHEM	312.46	365.96	312.21	0.76	0.28	-39.66
MPI-ESM-LR	138.72	161.69	138.16	0.80	0.51	-6.94
MPI-ESM-MR	133.98	159.69	133.47	0.77	0.51	-6.74
MRI-CGCM3	310.45	358.24	310.40	0.76	0.29	-37.97
NorESM1-M	152.64	209.02	150.60	0.74	0.44	-12.27

En la tabla, el modelo MIROC5 cuenta con BIAS más bajo que los demás, por otra parte, presenta un NSE -3.65, siendo el que mejor captura la variabilidad de los datos observados. Además, el MAE de 95.03 y el RMSE de 123.71 son más bajos que los otros GCM, indicando que este modelo comete menos errores en comparación con los demás.

Figura 41

Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1787

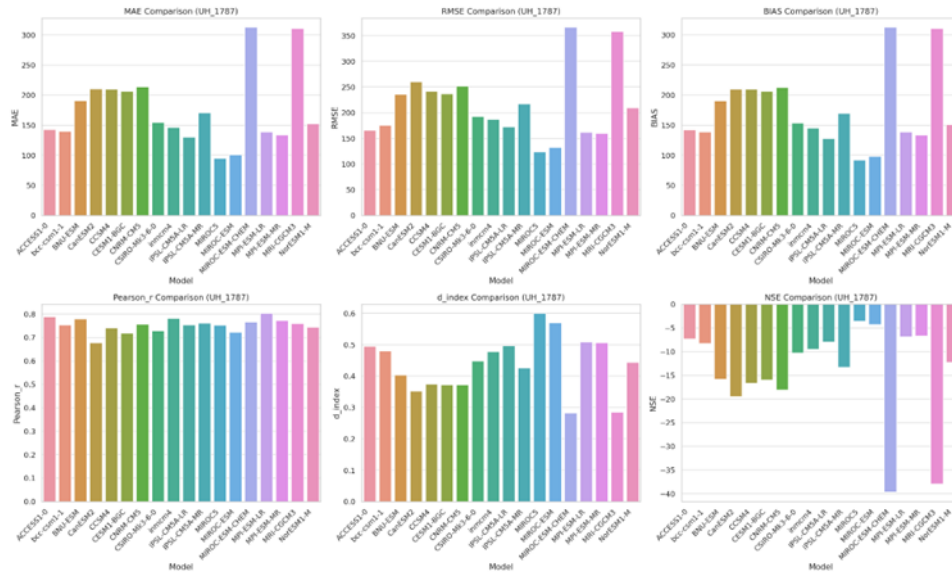
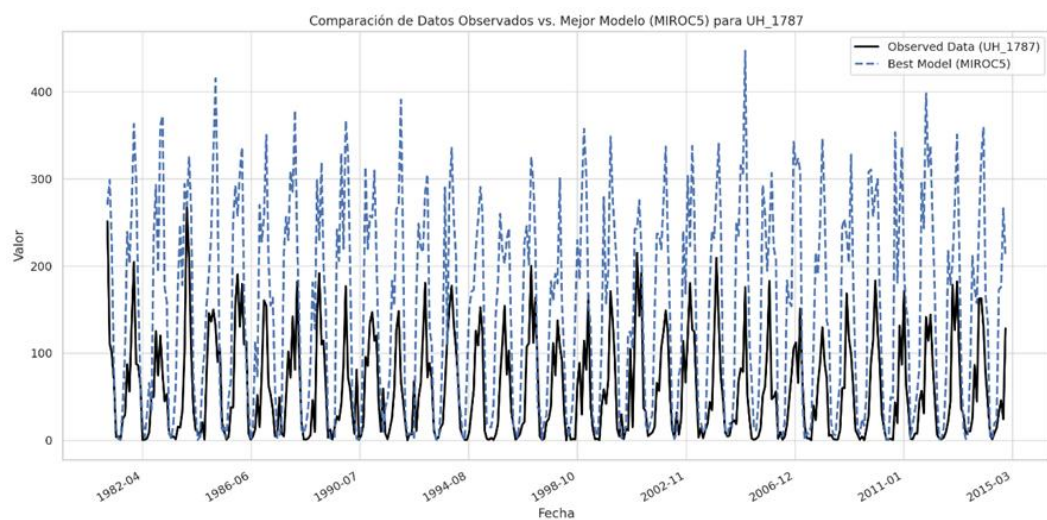


Figura 42

Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1787



En la comparación gráfica entre los valores observados y los predichos por el mejor modelo, se observa un ajuste adecuado a lo largo del tiempo es del

modelo MIROC5, capturando tanto las tendencias como los picos de los datos observados.

Tabla 28

Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1788

Model	MAE	RMSE	BIAS	Pearson_r	d_index	NSE
ACCESS1-0	132.79	155.62	131.92	0.77	0.53	-5.89
bcc-csm1-1	140.10	175.95	138.60	0.75	0.49	-7.81
BNU-ESM	190.16	235.17	189.04	0.77	0.41	-14.74
CanESM2	202.71	251.04	202.02	0.65	0.37	-16.94
CCSM4	208.19	238.65	207.83	0.73	0.39	-15.21
CESM1-BGC	204.95	234.68	204.52	0.71	0.39	-14.67
CNRM-CM5	206.14	241.19	205.64	0.73	0.39	-15.56
CSIRO-Mk3-6-0	158.93	199.38	157.53	0.69	0.44	-10.31
inmcm4	142.50	183.43	140.59	0.75	0.49	-8.58
IPSL-CM5A-LR	127.91	170.61	125.38	0.75	0.51	-7.28
IPSL-CM5A-MR	154.61	196.69	153.25	0.76	0.47	-10.01
MIROC5	94.74	123.83	90.83	0.73	0.61	-3.36
MIROC-ESM	100.19	131.85	96.47	0.70	0.58	-3.95
MIROC-ESM-CHEM	319.30	374.75	319.00	0.74	0.28	-38.97
MPI-ESM-LR	138.77	161.93	137.99	0.79	0.52	-6.46
MPI-ESM-MR	134.02	159.55	133.14	0.76	0.52	-6.24
MRI-CGCM3	298.91	343.96	298.70	0.75	0.30	-32.67
NorESM1-M	149.25	202.62	146.28	0.75	0.47	-10.69

Del cuadro, el modelo MIROC5, presenta un NSE -3.36 el cual es alto, teniendo una mejor variabilidad de los datos observados. Además, los valores de MAE y RMSE presentan valores más bajos (94.74 y 123.83), lo que indica que el modelo MIROC5 comete menos errores absolutos y relativos en comparación con los demás.

Figura 43

Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1788

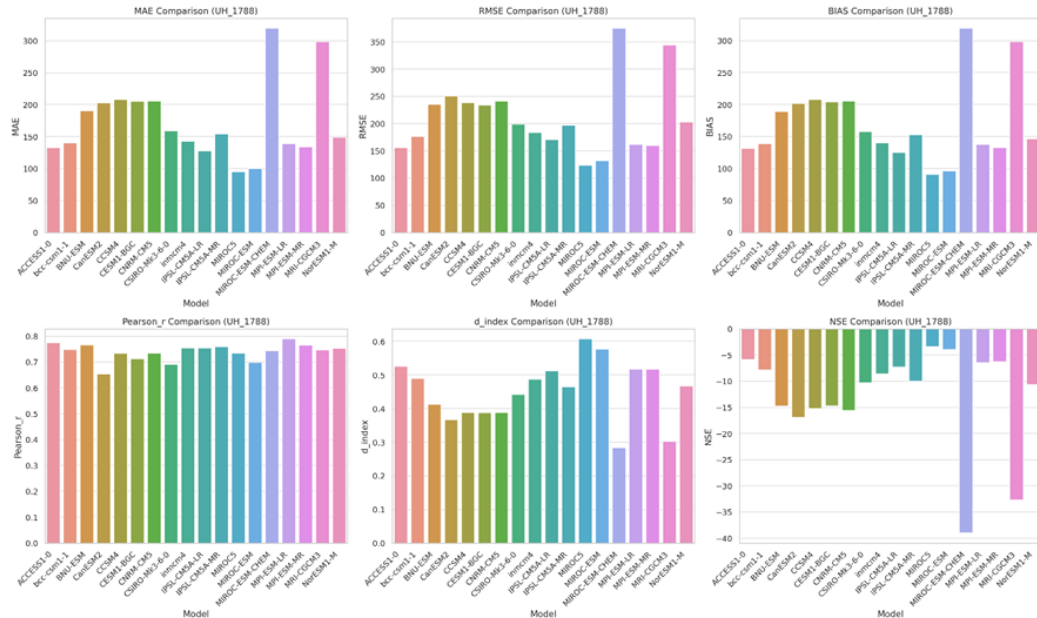
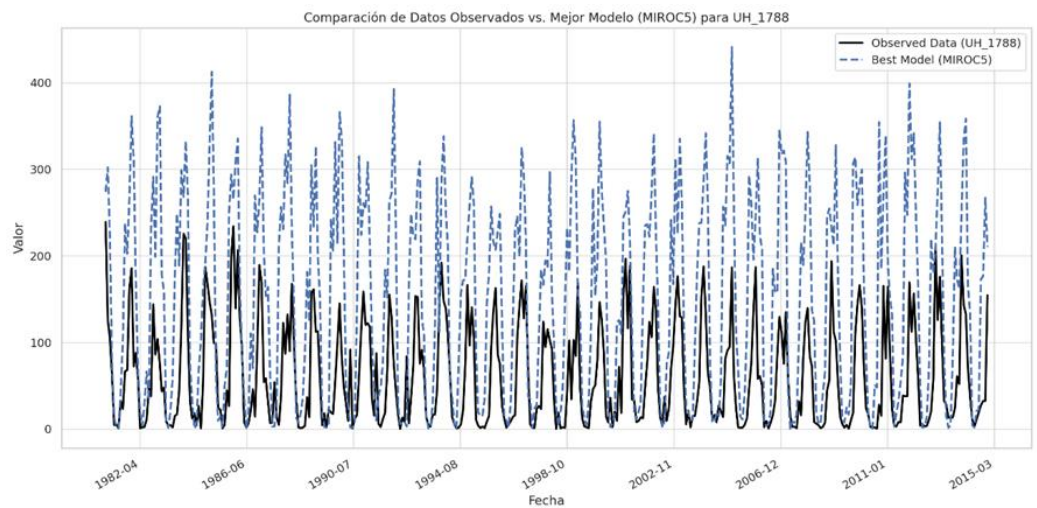


Figura 44

Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1788



En la gráfica de comparación entre los valores de los GCM, se observa un mejor ajuste al modelo MIROC5, reflejando las tendencias de los datos observados.

Tabla 29

Resultados de Métricas de Evaluación de GCM para UH 1789

Model	MAE	RMSE	BIAS	Pearson_r	d_index	NSE
ACCESS1-0	126.49	147.54	125.88	0.80	0.57	-4.05
bcc-csm1-1	133.53	169.26	131.92	0.75	0.53	-5.64
BNU-ESM	182.72	226.72	181.49	0.77	0.45	-10.92
CanESM2	187.71	233.13	186.90	0.67	0.41	-11.60
CCSM4	215.04	246.77	214.81	0.73	0.40	-13.12
CESM1-BGC	210.48	241.16	210.21	0.72	0.40	-12.49
CNRM-CM5	211.40	248.70	210.94	0.74	0.41	-13.35
CSIRO-Mk3-6-0	161.94	202.32	160.46	0.72	0.47	-8.49
inmcm4	144.17	185.05	142.44	0.77	0.52	-6.94
IPSL-CM5A-LR	128.48	172.06	125.50	0.74	0.54	-5.87
IPSL-CM5A-MR	183.67	237.73	182.18	0.78	0.45	-12.11
MIROC5	88.13	116.17	83.82	0.76	0.66	-2.13
MIROC-ESM	93.71	124.20	89.43	0.73	0.63	-2.58
MIROC-ESM-CHEM	333.01	390.76	332.65	0.76	0.30	-34.41
MPI-ESM-LR	139.27	161.50	138.52	0.79	0.55	-5.05
MPI-ESM-MR	135.43	160.23	134.72	0.77	0.54	-4.95
MRI-CGCM3	292.43	337.82	292.27	0.76	0.33	-25.47
NorESM1-M	141.50	194.37	138.23	0.77	0.52	-7.76

El modelo seleccionado del cuadro, cuyo valor de BIAS es el más bajo con 83.82, además su valor de NSE -2.13 es más óptimo, y al igual que las demás unidades hidrográficas esta captura mejor la variabilidad de los datos observados, es el modelo MIROC5. Además, de mostrar los valores más bajos de MAE y RMSE en comparación con los demás.

Figura 45

Comparación de métricas de Sesgo de modelos climáticos globales (sin corregir) para la variable de precipitación en la UH 1789

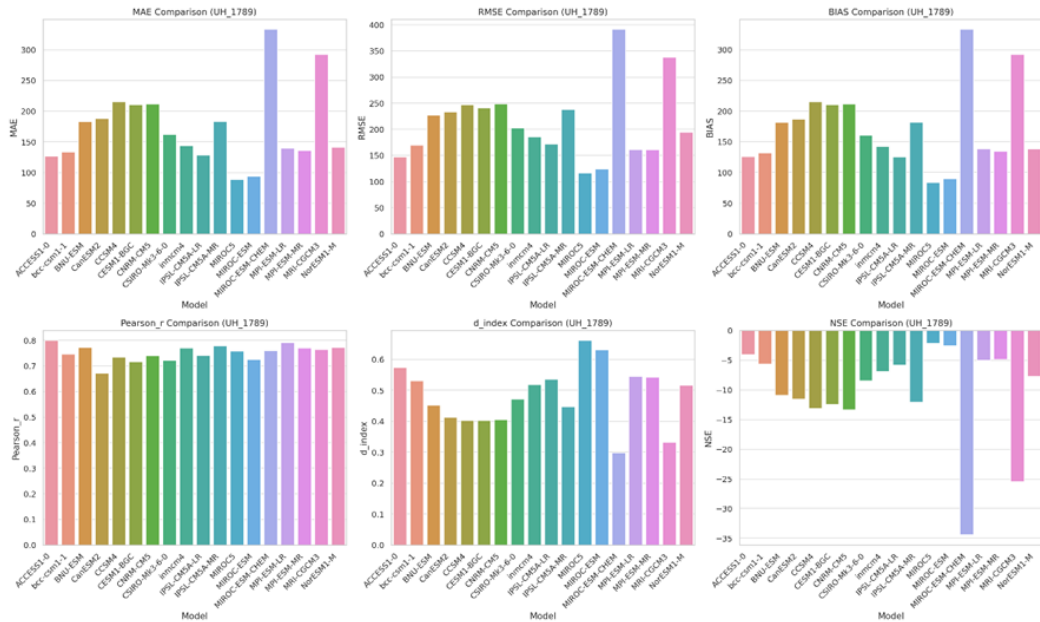
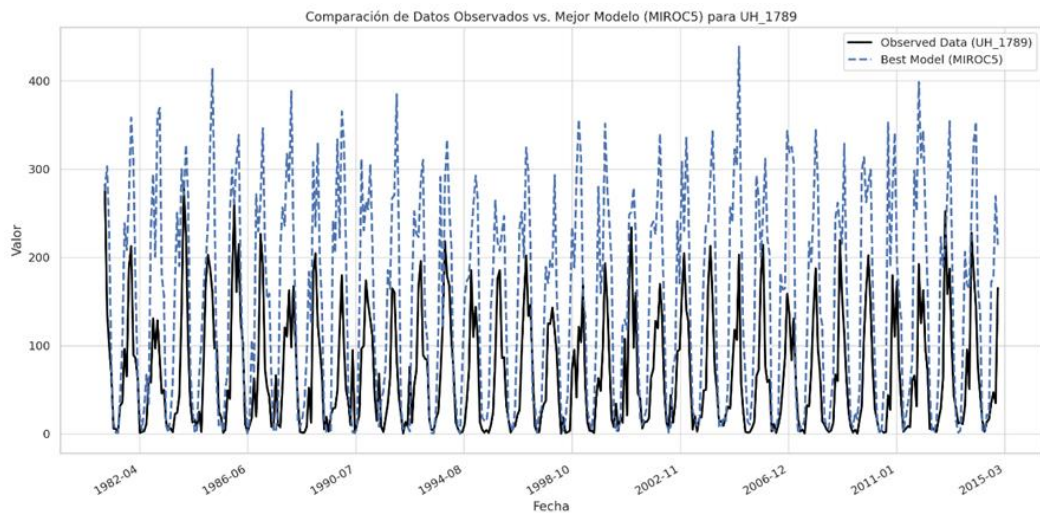


Figura 46

Comparación de datos observados con el mejor modelo (MIROC5) para la variable de precipitación en la UH 1789





En la gráfica el GCM que tiene mejor desempeño es el modelo MIROC5 con un adecuado ajuste a lo largo del tiempo.

4.2.4. Corrección del sesgo y selección de modelo

Para este análisis, se implementó la técnica de mapeo de cuantiles para corregir el sesgo sistemático de los GCM, ajustando las distribuciones de los modelos simulados para que coincidan con las distribuciones empíricas de los datos observados. El ajuste se aplicó utilizando los cuantiles correspondientes tanto en el período histórico como en las proyecciones futuras.

Los resultados indicaron que, tras la corrección de sesgo por mapeo de cuantiles, se observó una reducción significativa en el sesgo sistemático de las simulaciones de los modelos GCM en comparación con los datos observados. Antes de la corrección, en el caso de los valores de PBIAS eran valores altos. Sin embargo, después de aplicar el mapeo de cuantiles, estos valores se redujeron, presentaron menores sesgos después de la corrección, con valores de PBIAS cercanos a 0, lo que sugiere que estas simulaciones son más confiables para el contexto del estudio, estableciéndose que el mejor modelo es el MIROC5.

Figura 47

Sesgo de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM) para la variable de precipitación - Mapa de calor de PBIAS donde W1: UH 1786; W2:UH1789; W3:1787; W4: 1785; W5:1788.

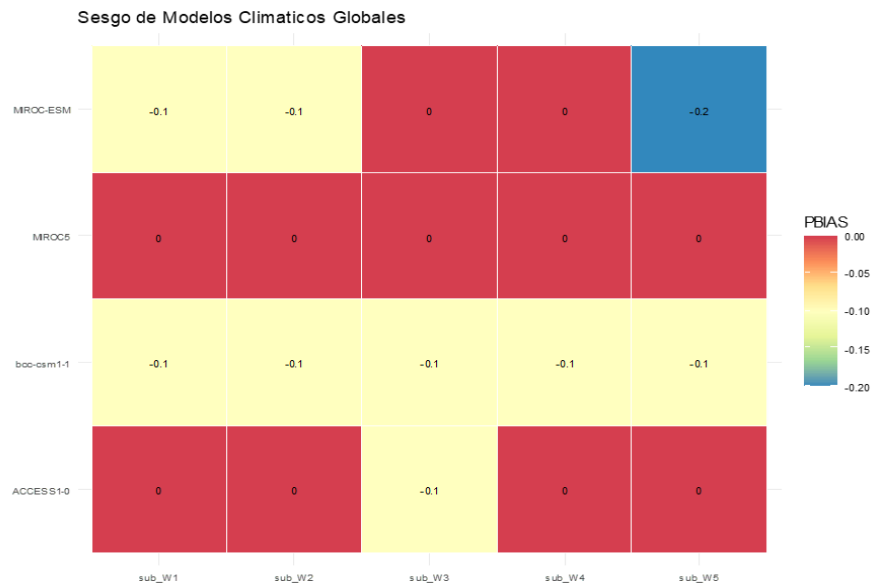


Figura 48

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01785

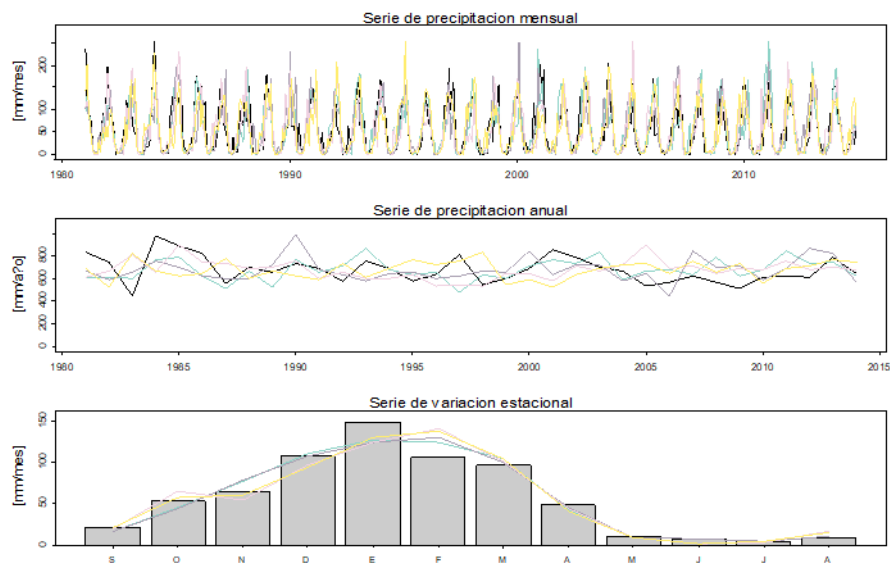


Figura 49

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01786

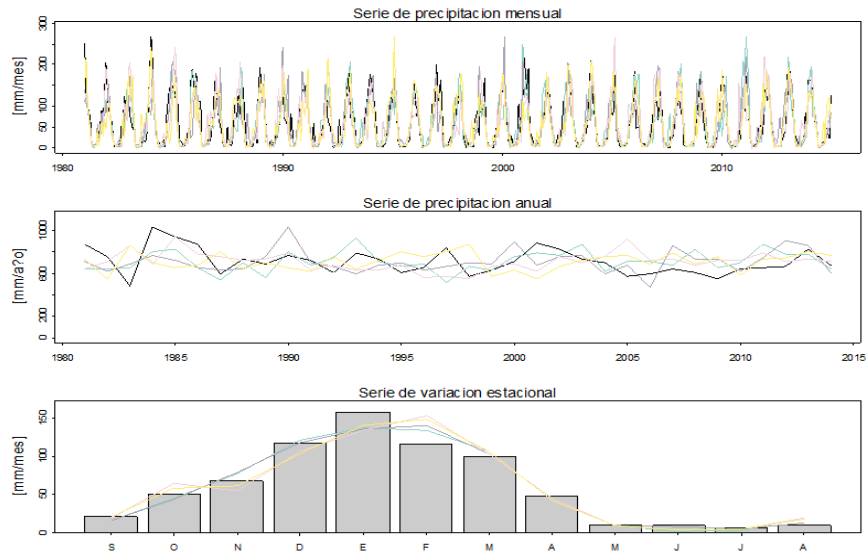


Figura 50

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01787

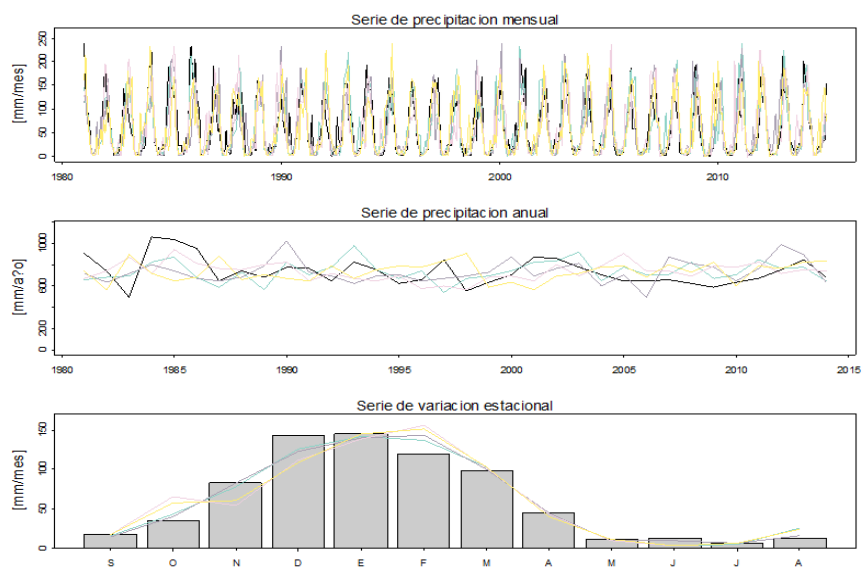


Figura 51

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01788

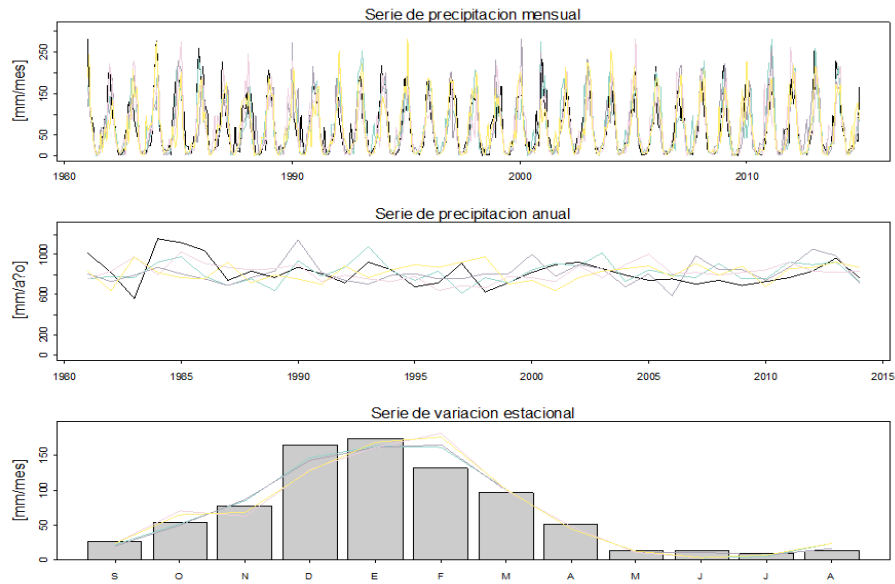
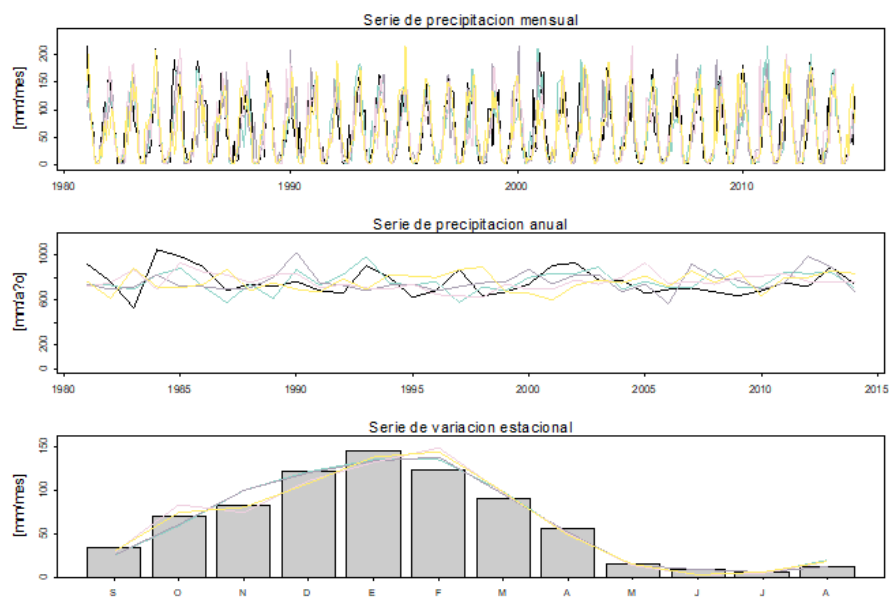


Figura 52

Series de precipitación mensual, anual y estacional observada y de modelos climáticos globales (con corrección de sesgo Quantile Mapping - QM), en la UH 01789





4.2.5. Obtención de datos y proyección de cambios en la precipitación bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5

Una vez obtenido los resultados del mapeo de cuantiles en el periodo de control, se realizó el mapeo de cuantiles para el periodo observado de control que será de 2046 al 2075, para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5, y evaluar los cambios en la precipitación bajo escenarios del cambio climático.

- Escenario RCP 4.5

Tras un análisis comparativo de 18 modelos climáticos globales (GCM), se identificó al modelo MIROC5 como el que presenta el menor sesgo en relación con los datos observados, lo que lo posiciona como el modelo más adecuado para la evaluación de proyecciones climáticas en la región de estudio. Utilizando este modelo, se implementó un mapeo de cuantiles para cada una de las unidades hidrográficas (UH) de la subcuenca del río Putina, bajo el escenario de concentración representativa RCP 4.5. La proyección abarcó el periodo comprendido entre 2046 y 2075, permitiendo estimar los cambios en la precipitación futura respecto a la línea base histórica.

Figura 53

Diagrama de caja comparativo de la precipitación observada vs la precipitación del escenario RCP 4.5 del GCM MIROC5 para las unidades hidrográficas de la sub cuenca Putina.

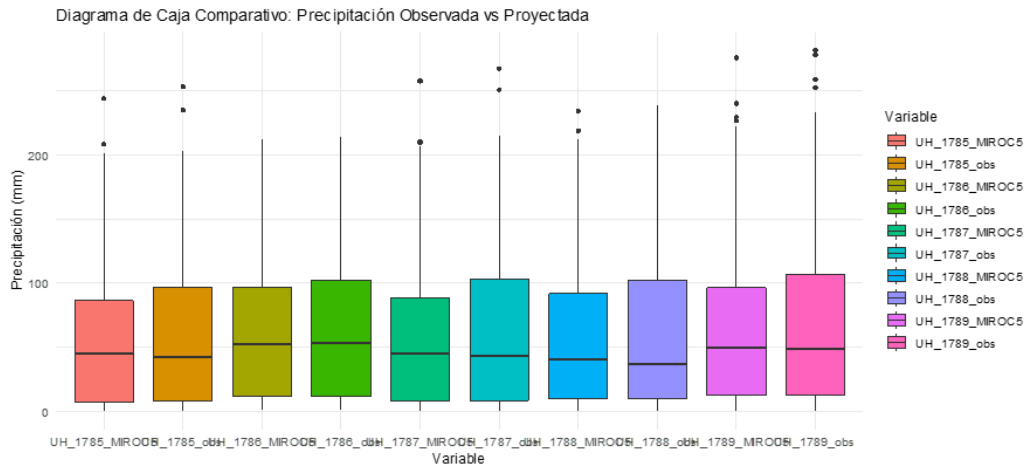


Tabla 30

Tasa de variación (%) de la precipitación por UH, para un escenario RCP 4.5

Unidad	Escenario RCP
Hidrográfica	4.5
UH-1785	-6.8
UH-1786	-5.6
UH-1787	-7.3
UH-1788	-7.8
UH-1789	-8.0

Los resultados de las proyecciones climáticas indican una disminución generalizada en la precipitación para todas las unidades hidrográficas. Específicamente, se observó que la UH 1786 presentará una variación de -5.6% en la precipitación total, mientras que la UH 1789 y la UH 1787 registrarán disminuciones de -8.0% y -7.3%, respectivamente. Por su parte, la UH 1785 y la UH 1788 muestran también una tendencia negativa, con reducciones proyectadas



de -6.8% y -7.8%. Estas cinco unidades hidrográficas, que conforman la subcuenca del río Putina, exhiben un patrón homogéneo de disminución en la disponibilidad hídrica bajo condiciones climáticas futuras, lo que sugiere un impacto potencial significativo en los recursos hídricos locales y en el régimen de caudales.

- **Comportamiento mensual y variaciones significativas**

El análisis de la variación mensual de la precipitación proyectada bajo el escenario de concentración representativa RCP 4.5 para el periodo 2046-2075 se realizó en cinco unidades hidrográficas (UH) pertenecientes a la subcuenca del río Putina (UH 1785, UH 1786, UH 1787, UH 1788 y UH 1789). Los resultados revelan un comportamiento heterogéneo de las proyecciones de precipitación, con patrones diferenciados según la estacionalidad. A continuación, se describen los principales hallazgos mensuales para cada UH, destacando los periodos de aumento o disminución significativa en la precipitación, así como su posible impacto hidrológico.

Tabla 31

Tasa de variación (%) estacional, de la precipitación por subcuencas para un escenario RCP 4.5

	UH_1785	UH_1786	UH_1787	UH_1788	UH_1789
Enero	-17.1	-10.9	-15.7	-4.6	-9.7
Febrero	8.6	-1.2	6.4	4.5	8.7
Marzo	2.9	4.5	2.2	0.8	1.0
Abril	-11.8	-11.6	-9.6	-5.7	-10.7
Mayo	-4.7	-3.9	-3.6	-8.3	-0.5
Junio	-83.1	-74.0	-80.8	-81.1	-76.8
Julio	-21.8	-12.7	-30.6	-16.6	-31.0
Agosto	4.8	0.1	14.0	15.7	18.7
Setiembre	-6.8	-11.5	-5.5	-7.2	-2.7
Octubre	32.5	29.5	40.0	100.2	43.4
Noviembre	0.1	2.5	-5.1	-21.7	-6.0
Diciembre	-32.7	-27.3	-32.7	-40.1	-37.6

Figura 54

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH 01785

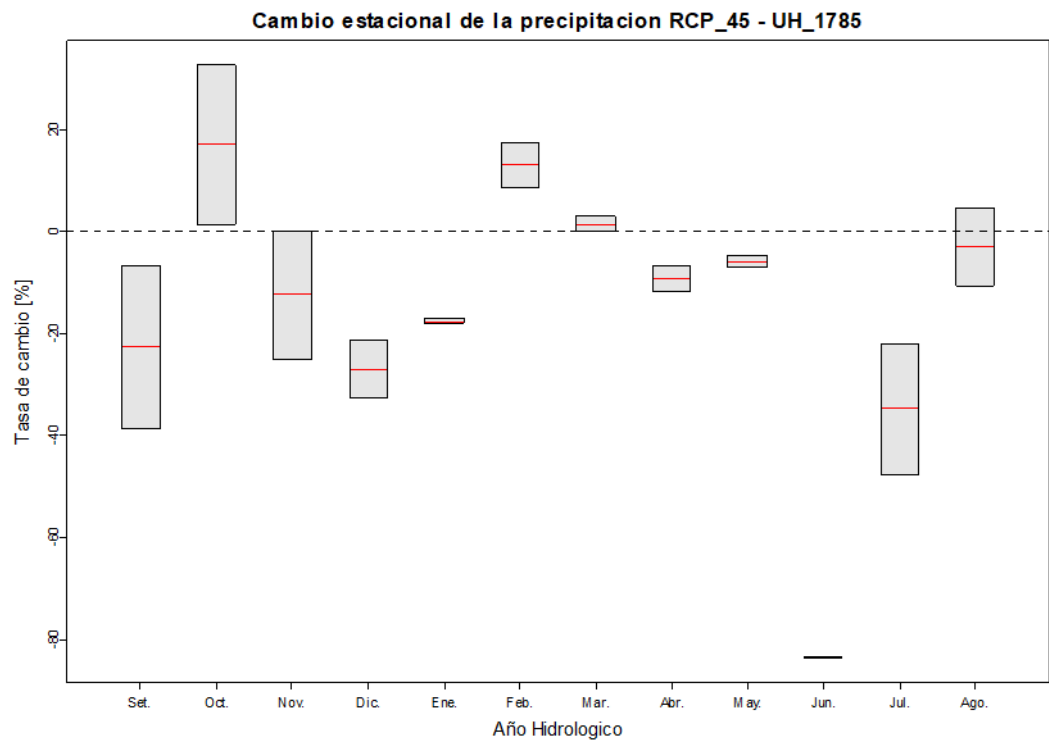


Figura 55

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH

01786

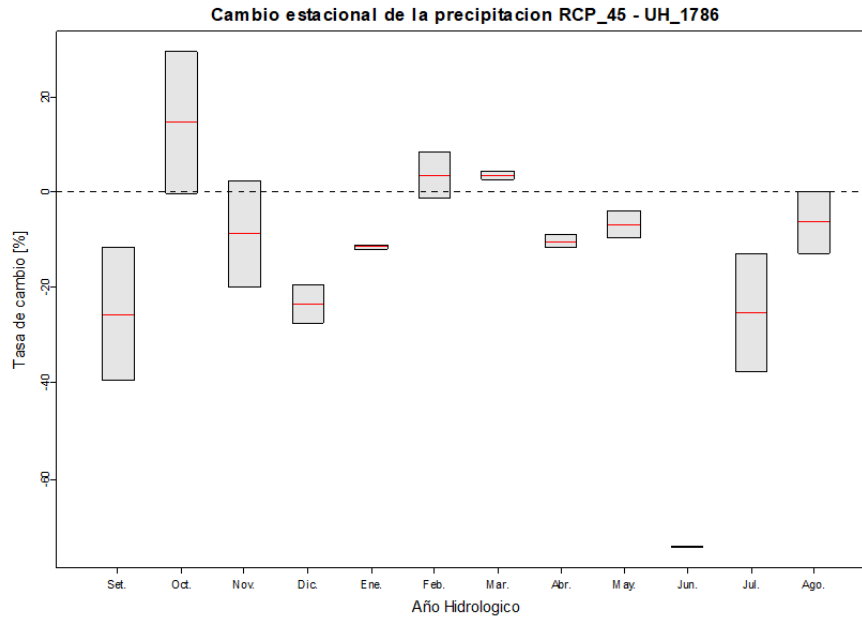


Figura 56

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH

01787

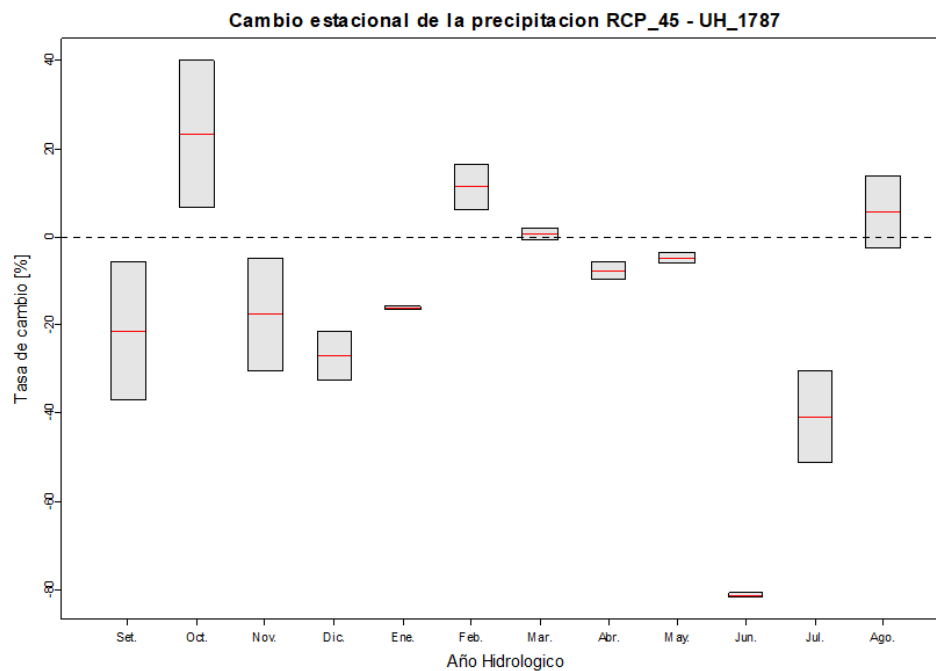


Figura 57

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH

01788

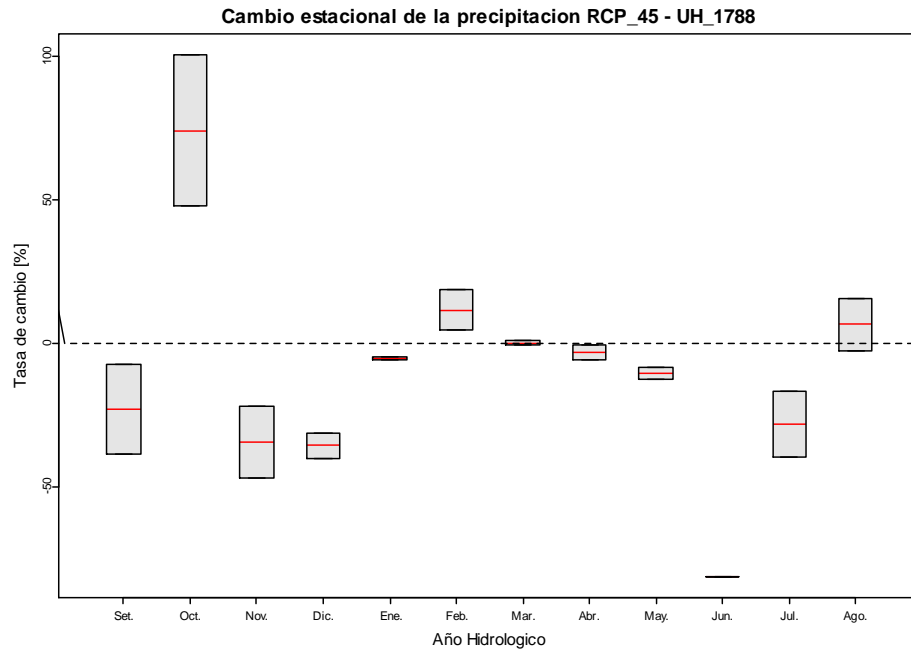
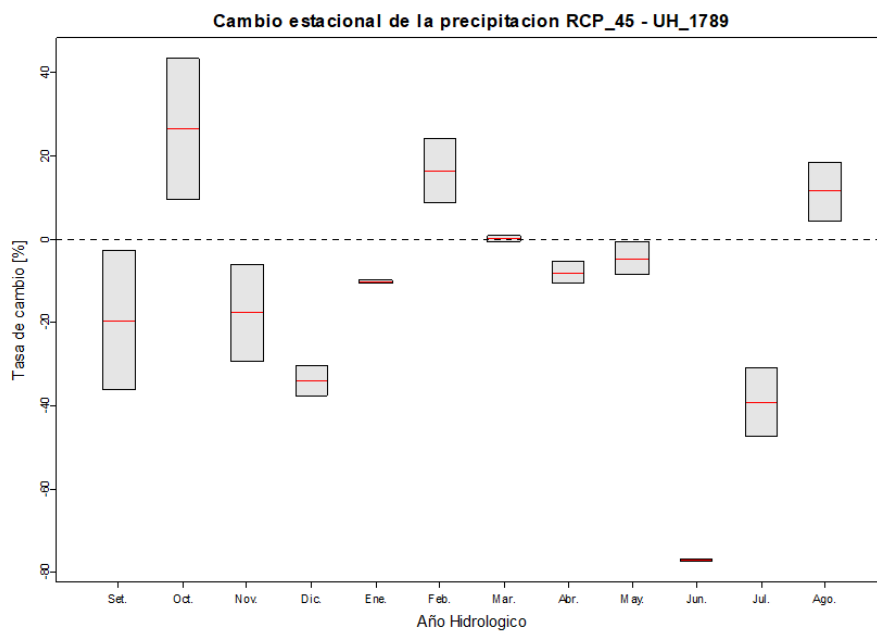


Figura 58

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 4.5, en la UH

01789





a) Meses de la temporada húmeda (enero a marzo y octubre a diciembre)

- Durante los meses de la temporada húmeda (enero a marzo), la mayoría de las unidades hidrográficas muestran variaciones negativas significativas al inicio del año (enero) y una recuperación parcial en febrero y marzo. En enero, se observan reducciones marcadas en la precipitación para todas las UH, con caídas de -10.9% (UH 1786), -15.7% (UH 1787) y un máximo de -17.1% (UH 1785). Estas disminuciones iniciales sugieren un retraso en el inicio del periodo lluvioso, lo que podría afectar la recarga hídrica de los sistemas locales.
- En febrero, la tendencia se revierte, mostrando incrementos positivos en la mayoría de las UH, con valores máximos de +8.7% y +8.6% para las UH 1789 y UH 1785, respectivamente. Este comportamiento compensatorio podría estar asociado a un patrón de redistribución de la precipitación estacional.
- Para el mes de marzo, las variaciones positivas se estabilizan, con incrementos de hasta +4.5% (UH 1786) y +2.9% (UH 1785), lo que sugiere una prolongación del pico de lluvias al final de la temporada húmeda.
- En los meses de octubre y noviembre, se destacan las fuertes anomalías positivas en octubre, especialmente en la UH 1788, con un aumento de +100.2%, lo que indica un posible desplazamiento del pico de lluvias hacia el último trimestre del año. Sin embargo, en diciembre, todas las UH registran caídas drásticas, con la UH 1788 presentando la mayor reducción (-40.1%), lo que podría señalar un acortamiento del periodo húmedo y una intensificación de la estacionalidad.



b) Meses de la temporada seca (abril a septiembre):

- Durante la temporada seca, se observan reducciones generalizadas en la precipitación para todas las UH. Los descensos más pronunciados ocurren en los meses de junio y julio, donde la disminución alcanza valores extremos: -74.0% (UH 1786) y -83.1% (UH 1785) en junio, lo que indica una reducción drástica de la precipitación durante estos meses, reflejando condiciones de sequía severa.
- En julio, la UH 1789 y la UH 1787 muestran caídas de -31.0% y -30.6%, respectivamente, mientras que la UH 1788 y UH 1786 presentan disminuciones moderadas. Estas anomalías negativas sugieren un alargamiento del periodo seco, lo que podría tener efectos adversos en la disponibilidad de agua superficial y la recarga de acuíferos.
- En contraste, los meses de agosto y septiembre muestran una ligera recuperación, con incrementos positivos en agosto para la UH 1789 (+18.7%) y UH 1788 (+15.7%), lo que podría indicar eventos puntuales de precipitación.

c) Impacto de las variaciones mensuales en la precipitación de la subcuenca:

- En general, se observa que la variación mensual de la precipitación proyectada tiende a mostrar un patrón de disminuciones significativas en los meses de transición (abril y septiembre), con reducciones promedio de hasta -11.6% (abril) y -11.5% (septiembre) para la UH 1786. Esto implica que la



transición entre la temporada seca y húmeda se vuelve más marcada, lo que podría llevar a una mayor variabilidad interanual de la precipitación.

- Los incrementos abruptos en ciertos meses (febrero y octubre) sugieren la posibilidad de lluvias torrenciales concentradas en cortos periodos, aumentando el riesgo de eventos extremos como inundaciones repentinas.

d. Escenario RCP 8.5

En el contexto del escenario de altas emisiones RCP 8.5, se seleccionó el modelo climático global (GCM) MIROC5 como el modelo de mejor desempeño, dado que presentó el menor sesgo en comparación con 18 modelos climáticos evaluados. Utilizando este modelo, se llevó a cabo un mapeo de cuantiles para proyectar los cambios en la precipitación futura en cada una de las unidades hidrográficas (UH) que componen la subcuenca del río Putina, para el periodo 2046-2075. Este análisis permitió evaluar la variación en la precipitación respecto a los valores observados en la línea base histórica, proporcionando un panorama detallado de las posibles modificaciones en el régimen hídrico futuro bajo un escenario de cambio climático más severo.

Figura 59

Diagrama de caja comparativo de la precipitación observada vs la precipitación del escenario RCP 8.5 del GCM MIROC5 para las unidades hidrográficas de la sub cuenca Putina.

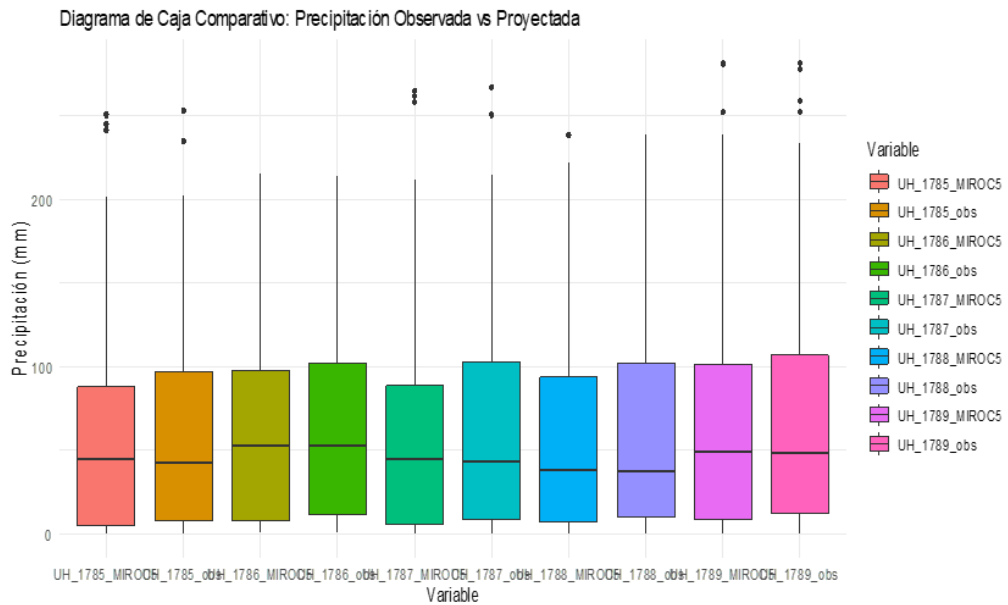


Tabla 32

Tasa de variación (%) de la precipitación por UH, para un escenario RCP 8.5

Unidad hidrográfica	Escenario RPC 8.5
UH-1785	-6.5
UH-1786	-6.2
UH-1787	-7.1
UH-1788	-8.5
UH-1789	-8.7

Los resultados indican una disminución generalizada en la precipitación anual en todas las unidades hidrográficas de la subcuenca, con variaciones negativas que oscilan entre -6.2% y -8.7%. La UH 1786 presenta una reducción



de -6.2%, mientras que la UH 1785 y la UH 1787 muestran disminuciones de -6.5% y -7.1%, respectivamente. Por otro lado, las mayores reducciones se observan en la UH 1789 y la UH 1788, con caídas proyectadas de -8.7% y -8.5% en la precipitación anual. Este patrón homogéneo de disminución sugiere que la subcuenca del río Putina experimentaría un estrés hídrico significativo en un contexto de cambio climático bajo el escenario RCP 8.5.

Dado que las cinco unidades hidrográficas (UH 1785, UH 1786, UH 1787, UH 1788 y UH 1789) forman parte integral de la subcuenca, los resultados resaltan la vulnerabilidad de esta región a las condiciones climáticas futuras. Una reducción promedio de la precipitación anual de hasta -8.7% podría tener implicaciones directas en la disponibilidad de agua para la agricultura y el abastecimiento de agua potable, afectando así las actividades económicas locales y la seguridad hídrica de las comunidades dependientes del recurso.

- **Comportamiento mensual y variaciones significativas**

El análisis de la variación mensual de la precipitación proyectada bajo el escenario de concentración representativa RCP 8.5 para el periodo 2046-2075 se llevó a cabo en las cinco unidades hidrográficas (UH) que conforman la subcuenca del río Putina (UH 1785, UH 1786, UH 1787, UH 1788 y UH 1789). Los resultados reflejan un patrón de mayor intensidad y variabilidad en comparación con el escenario RCP 4.5, indicando un mayor impacto climático en la región bajo condiciones de cambio climático severas. A continuación, se describen las principales variaciones mensuales observadas para cada UH, destacando los periodos críticos de incremento o reducción de la precipitación y sus posibles implicaciones hidrológicas.

Tabla 33

Tasa de variación (%) estacional, de la precipitación por subcuencas para un escenario RCP 4.5

Mes	UH_1786	UH_1789	UH_1787	UH_1785	UH_1788
Enero	-18.4	-19.4	-24.4	-25.9	-14.9
Febrero	11.8	27.6	23.0	25.3	22.0
Marzo	3.4	-1.3	1.9	3.2	-0.8
Abril	-4.1	0.0	0.9	-1.3	4.1
Mayo	10.2	13.5	18.0	16.8	10.7
Junio	-60.4	-67.0	-70.4	-71.4	-70.7
Julio	-59.9	-67.8	-72.0	-72.7	-65.8
Agosto	-19.2	-2.5	-5.5	-13.4	-7.2
Setiembre	-28.1	-24.3	-28.3	-29.6	-30.4
Octubre	13.3	26.5	25.0	19.1	72.6
Noviembre	4.5	-6.0	-6.2	-0.6	-21.4
Diciembre	-24.7	-37.7	-29.1	-29.0	-38.9

Figura 60

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH 01785

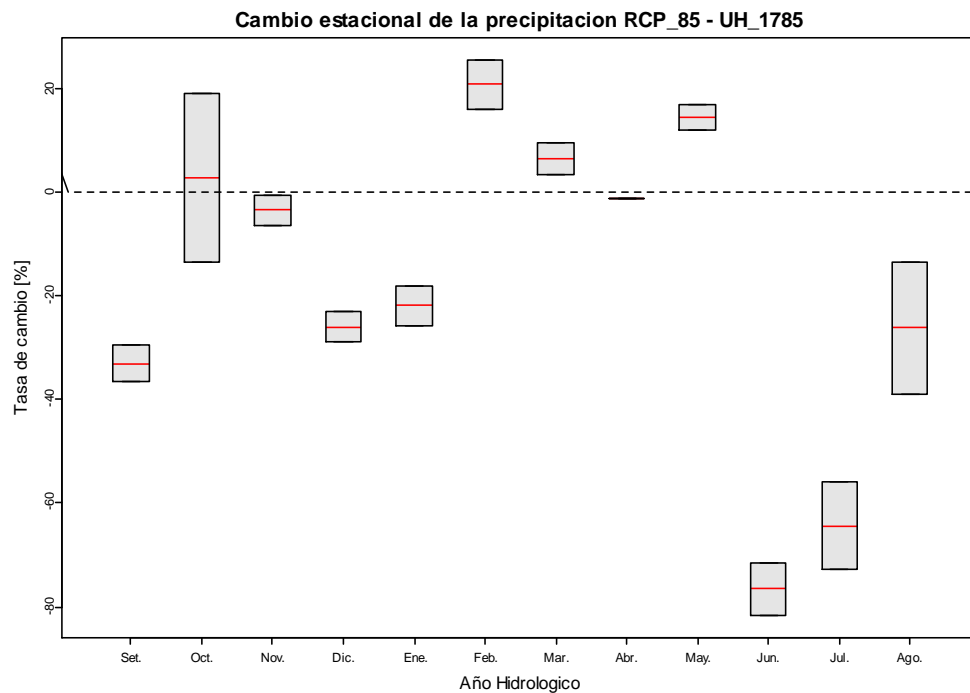


Figura 61

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH

01786

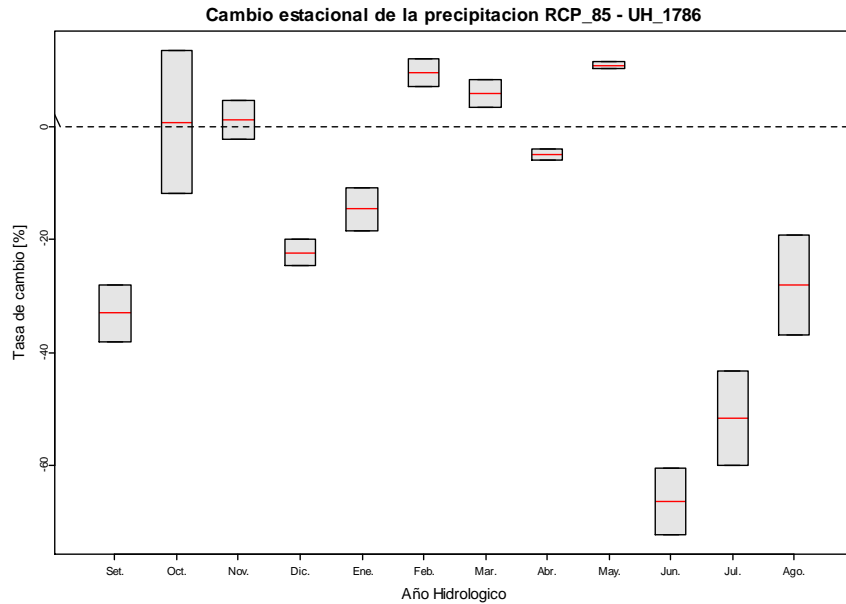


Figura 62

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH

01787

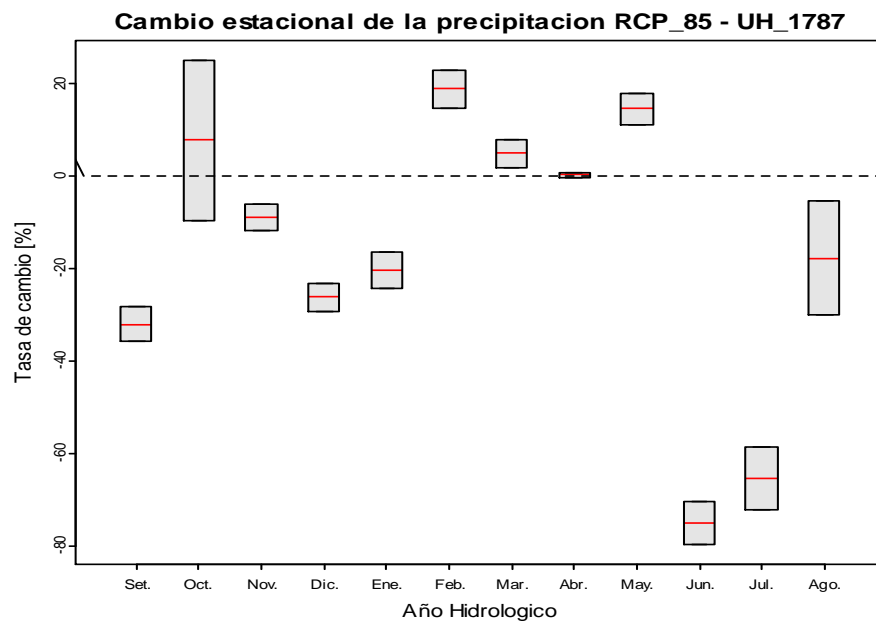


Figura 63

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH

01788

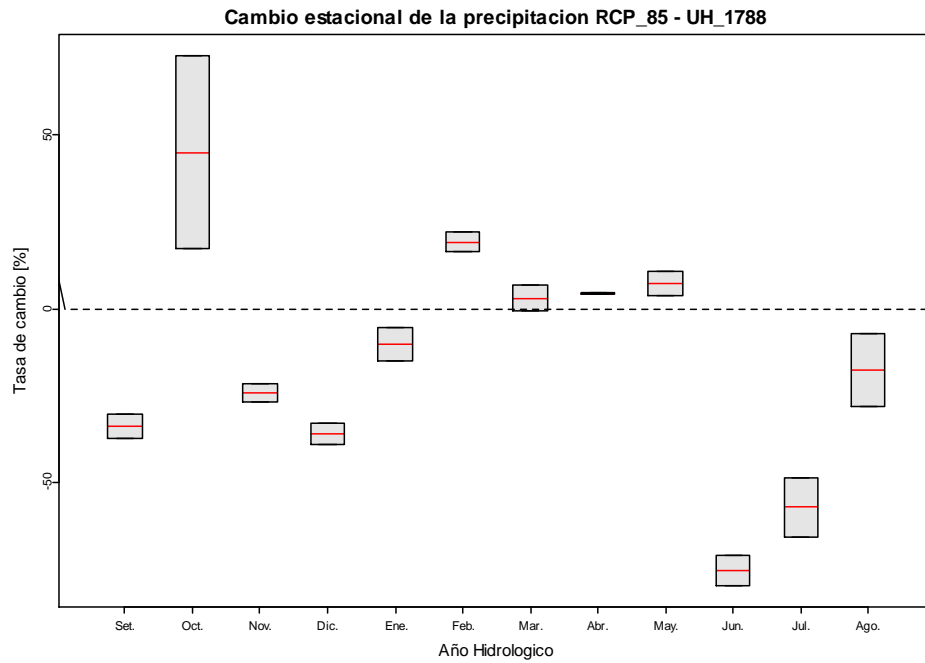
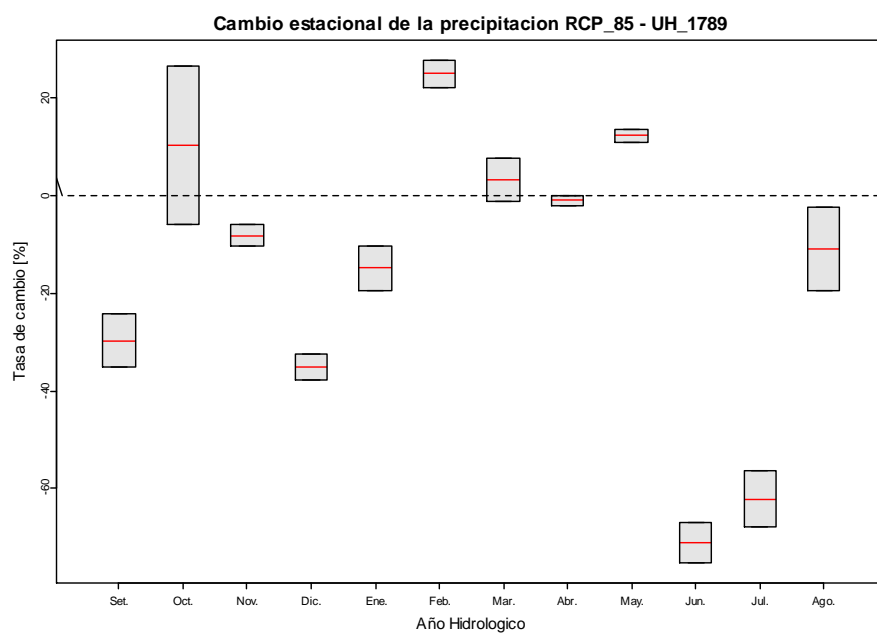


Figura 64

Cambio estacional de la precipitación, para un escenario RCP 8.5, en la UH

01789





a) Meses de la temporada húmeda (enero a marzo y octubre a diciembre):

- Durante los meses de enero a marzo, la precipitación proyectada muestra un comportamiento mixto. En enero, se observa una fuerte disminución en todas las UH, con caídas que oscilan entre -18.4% (UH 1786) y -25.9% (UH 1785), lo que indica un retraso en el inicio de la temporada húmeda.
- En contraste, febrero se caracteriza por un fuerte aumento en la precipitación para todas las UH, con variaciones de hasta +27.6% (UH 1789) y +25.3% (UH 1785). Estos incrementos repentinos sugieren un cambio brusco hacia un régimen de lluvias torrenciales, lo que incrementa el riesgo de inundaciones en la sub cuenca.
- En el mes de marzo, la tendencia se estabiliza con ligeros incrementos para la mayoría de las UH. Sin embargo, la UH 1789 y la UH 1788 registran anomalías negativas de -1.3% y -0.8%, respectivamente, lo que refleja una alta variabilidad intraestacional en la distribución de las lluvias.
- Los meses de octubre y noviembre presentan comportamientos divergentes. En octubre, se observan aumentos sustanciales en la UH 1788 (+72.6%) y UH 1789 (+26.5%), mientras que, en noviembre, las variaciones vuelven a ser negativas para todas las UH, con la UH 1788 mostrando la mayor reducción (-21.4%). Este cambio abrupto podría alterar el patrón de inicio y fin de la temporada húmeda.
- Finalmente, en diciembre, las reducciones proyectadas son nuevamente significativas, con disminuciones que van desde -24.7% (UH 1786) hasta -



38.9% (UH 1788), lo que indica una posible acortación de la temporada húmeda y una intensificación de la sequía al final del año.

b) Meses de la temporada seca (abril a septiembre):

- Los meses de la temporada seca se caracterizan por reducciones generalizadas en la precipitación para todas las UH, con especial énfasis en los meses de junio, julio y septiembre. En junio, se proyecta una caída drástica en la precipitación, alcanzando valores de -71.4% (UH 1785) y -70.7% (UH 1788). Esta reducción extrema sugiere la intensificación de las condiciones de aridez en la región durante el periodo seco.
- En julio, la disminución es aún más acentuada, con reducciones de hasta -72.7% (UH 1785) y -72.0% (UH 1787), lo que refleja un severo déficit hídrico en la subcuenca. Estos resultados indican una mayor vulnerabilidad de la subcuenca a eventos de sequía prolongada durante la estación seca.
- En septiembre, las reducciones permanecen elevadas, especialmente en la UH 1788 y UH 1785, con valores de -30.4% y -29.6%, respectivamente. Este comportamiento indica un alargamiento del periodo seco y una reducción en la precipitación durante los meses de transición, lo que podría impactar negativamente la recarga de las fuentes hídricas y la disponibilidad de agua en la cuenca.

c) Anomalías positivas en meses críticos (febrero y octubre):

- El escenario RCP 8.5 muestra anomalías positivas notables en los meses de febrero y octubre, que podrían sugerir un cambio hacia eventos de precipitación extrema concentrados en periodos cortos. En febrero, el



incremento de hasta +27.6% (UH 1789) y +25.3% (UH 1785) podría generar riesgos de inundaciones repentinas, especialmente si la infraestructura de drenaje no está preparada para manejar este aumento.

- En octubre, la UH 1788 experimenta un aumento excepcional de +72.6%, lo que sugiere un desplazamiento del pico de lluvias hacia el último trimestre del año. Esta situación podría llevar a la saturación del suelo y un aumento del caudal en los ríos locales, incrementando el riesgo de desbordamientos y erosión del suelo.

d) Impacto de las variaciones mensuales en la precipitación de la Subcuenca:

- Los resultados bajo el escenario RCP 8.5 sugieren que la subcuenca del río Putina podría experimentar una mayor variabilidad en el régimen de lluvias, con una tendencia generalizada hacia la reducción de la precipitación anual y periodos de sequía más prolongados durante la temporada seca. En particular, los meses de junio y julio representan los periodos de mayor vulnerabilidad hídrica, con reducciones extremas en la precipitación que podrían impactar la disponibilidad de agua superficial y subterránea en la subcuenca.
- Por otro lado, las anomalías positivas en febrero y octubre indican un aumento en la intensidad de los eventos de precipitación, lo que podría generar desafíos para la gestión de inundaciones y el control de caudales en las infraestructuras hidráulicas existentes.



- En general, las proyecciones bajo el escenario RCP 8.5 destacan la necesidad de implementar medidas de adaptación específicas, como la optimización del almacenamiento de agua, la planificación del uso del suelo y el fortalecimiento de la infraestructura hídrica para mitigar los impactos de la variabilidad climática. Además, se deben considerar estrategias de manejo integrado de cuencas que contemplen tanto la reducción de la disponibilidad hídrica durante la estación seca como el manejo de eventos extremos durante la temporada húmeda.

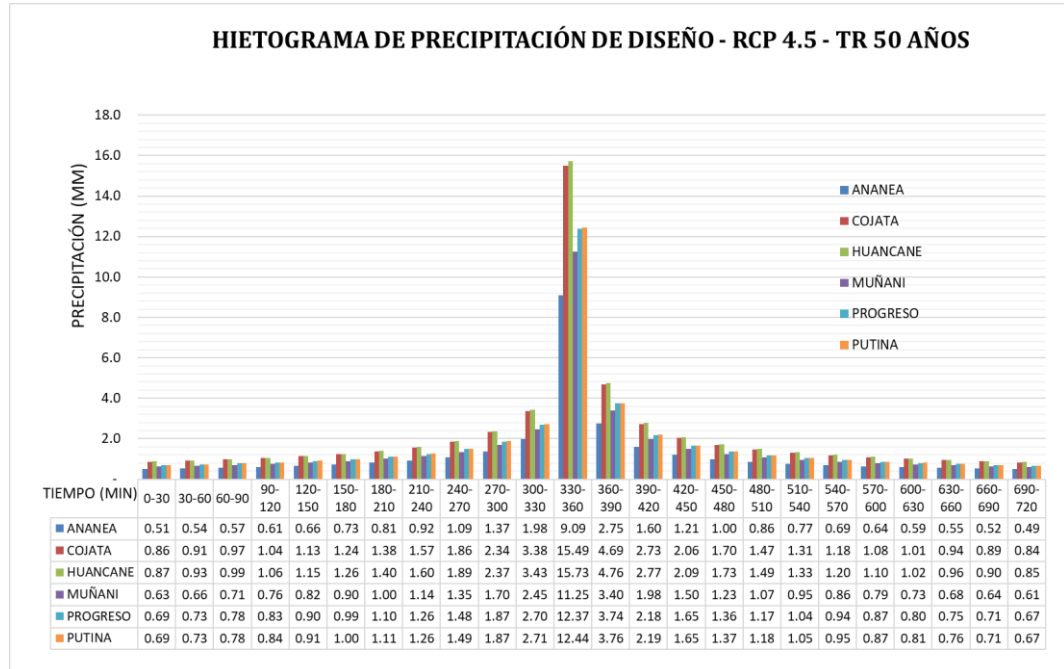
4.3. COMPORTAMIENTO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS EN LA SUBCUENCA BAJO LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO RCP 4.5 Y RCP 8.5 PARA LOS PERÍODOS FUTUROS 2025-2075, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO HEC HMS

4.3.1. Escenarios bajo RCP 4.5 en el periodo 2023 – 2075

Para el escenario RCP 4.5, que supone una reducción gradual de las emisiones de gases de efecto invernadero a medida que avanzamos hacia mediados de siglo, y que, si se logra cumplir con este escenario, se espera que los impactos del cambio climático sean moderados en comparación con escenarios más pesimistas. Sin embargo, con este escenario las proyecciones de precipitaciones que componen la subcuenca Putina, demuestran que son variables, en general se espera que haya cambios en los patrones de lluvia presentando disminuciones de las precipitaciones en algunas áreas y un aumento en otras, lo que genera consecuencias para la determinación de caudales picos, puesto que en la presente investigación se hallaron una disminución de los caudales máximos, esto proveniente de los hietogramas bajo el cambio climático

Figura 65

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 50 años

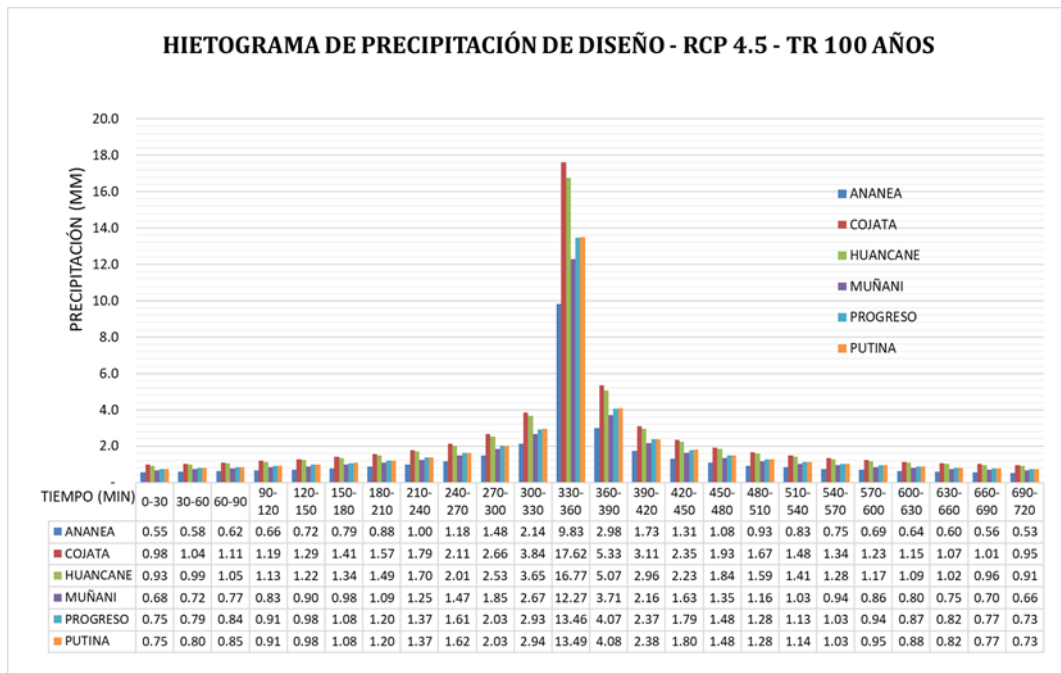


De la gráfica presente al comparar los picos de los hietogramas observados con las proyecciones bajo el escenario climático RCP 4.5 (figura 20), para un periodo de retorno de 50 años, se observa una ligera disminución en la mayoría de las estaciones de la subcuenca Putina. Por ejemplo, en la estación Ananea, la precipitación de diseño observado es de 10.09 mm, mientras que el proyectado bajo RCP 4.5 es de 9.07 mm, lo que representa una disminución del 9.94%. De manera similar, en la estación Huancané, el valor observado de 16.09 mm desciende a 15.73 mm en el escenario proyectado, reflejando una disminución del 2.27%. No obstante, algunas estaciones como Progreso muestran un ligero incremento, donde la precipitación proyectada es de 12.37 mm, ligeramente superior al valor observado de 12.11 mm, lo que indica un aumento del 2.19%. Estos resultados sugieren que, en general, las precipitaciones máximas tenderán a

disminuir levemente bajo el escenario RCP 4.5, con algunas variaciones localizadas, lo que podría influir en la reducción de los caudales máximos en ciertos puntos de la cuenca

Figura 66

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 100 años

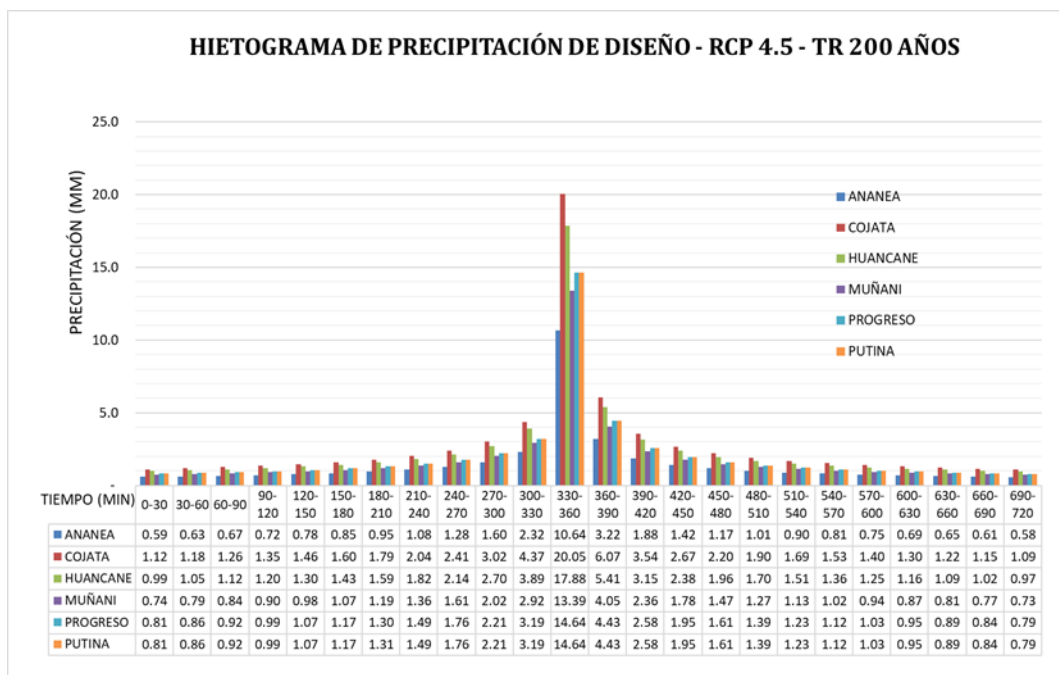


Para el periodo de retorno de 100 años, se observa una variación en los picos de precipitación en varias estaciones en diferencia con los hietogramas observados de la figura 21. En la estación Ananea, el valor observado es de 11.25 mm, mientras que bajo el escenario RCP 4.5 se proyecta un valor de 9.83 mm, lo que representa una disminución del 12.59%. En la estación Huancané, el valor observado es de 17.56 mm, mientras que el valor proyectado es de 16.77 mm, con una reducción del 4.49%. En contraste, algunas estaciones muestran un ligero aumento en los valores proyectados, como es el caso de Cojata, donde el valor observado es de 17.50 mm y el proyectado es de 17.62 mm, con un aumento

marginal del 0.68%. En Progreso, el caudal observado es de 12.98 mm, mientras que el proyectado bajo RCP 4.5 es de 13.46 mm, un incremento del 3.66%. Estos resultados muestran que, en general, los valores proyectados de precipitación bajo el escenario RCP 4.5 tienden a disminuir en la mayoría de las estaciones, aunque algunas estaciones como Cojata y Progreso muestran un ligero incremento, lo que indica una variabilidad espacial en la respuesta climática de la subcuenca Putina.

Figura 67

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 4.5 en un periodo de retorno de 200 años



En el análisis de los hietogramas para un periodo de retorno de 200 años bajo el escenario RCP 4.5, con respecto a los hietogramas de la precipitación observada de la figura 22, la estación Ananea muestra una reducción notable, pasando de 12.54 mm observado a 10.64 mm proyectado, lo que equivale a una disminución del 15.12%. De manera similar, en la estación Huancané, el valor observado de 19.15 mm disminuye a 17.86 mm, con una reducción del 6.67%. En

contraste, estaciones como Cojata y Progreso presentan aumentos en los valores proyectados: Cojata muestra un incremento de 19.77 mm observado a 20.05 mm proyectado, lo que representa un aumento del 1.44%, mientras que en Progreso el valor observado de 13.92 mm aumenta a 14.64 mm, con un incremento del 5.13%. Estos resultados indican que, bajo el escenario RCP 4.5, las estaciones en la cuenca muestran respuestas diferenciadas, las estaciones que se encuentran a mayor elevación vienen experimentando disminuciones significativas en los picos de precipitación, mientras que las estaciones con menor elevación registran incrementos leves, lo que refleja una variabilidad espacial considerable en la respuesta climática

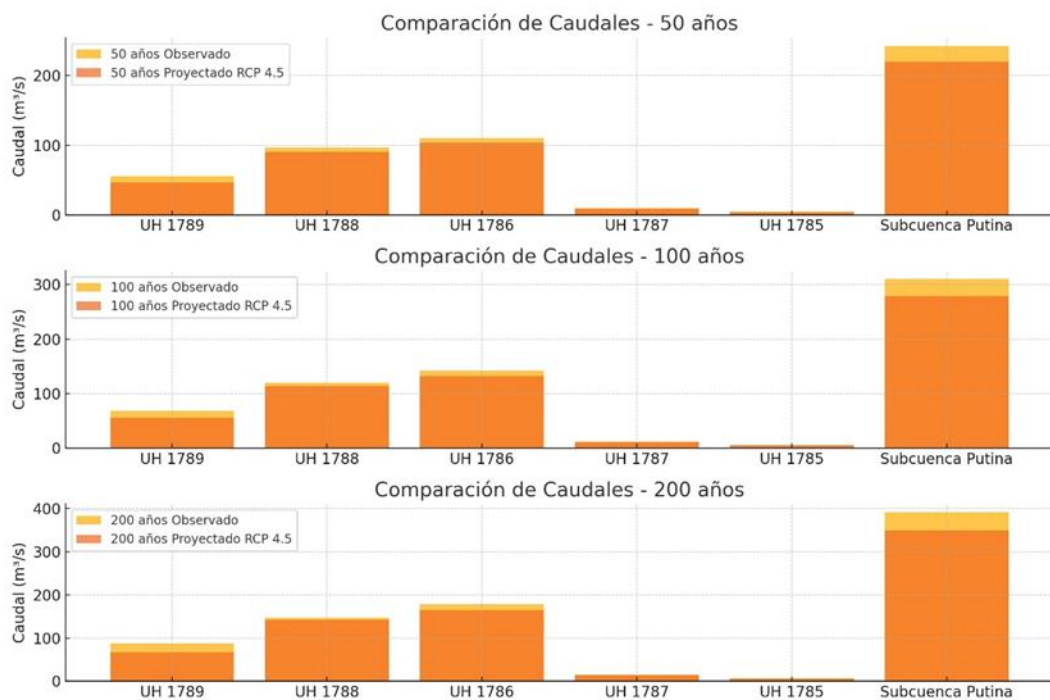
Tabla 34

Comparación de caudales máximos para el escenario RCP 4.5, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años

Unidad Hidrográfica	TR 50		TR 100		TR 200	
	OBS	RCP 4.5	OBS	RCP 4.5	OBS	RCP 4.5
UH 1789	55.2	46.7	68.2	55.8	86.9	66.8
UH 1788	96.5	90.4	119.5	113.7	147.5	141.6
UH 1786	110.2	103.7	141.1	131.3	178.4	164.2
UH 1787	9.4	8.4	11.6	10.8	14.3	13.6
UH 1785	4	3.5	5	4.6	6.2	5.9
Subcuenca Putina	242.8	220	310.1	279.2	391.9	350

Figura 68

Comparación de caudales para el escenario RPC 4.5



De la gráfica y cuadro se presentan los siguientes resultados:

Periodo de retorno de 50 años: Los caudales observados en todas las unidades hidrográficas y en la subcuenca Putina en general son mayores que los proyectados bajo el escenario RCP 4.5. Esto sugiere que, en el futuro bajo este escenario, los eventos de caudal máximo para un periodo de retorno de 50 años podrían ser menos severos en términos de magnitud. En particular, siendo la unidad UH 1789 la que muestra una disminución mayor, pasando de 55.2 m³/s observado a 46.7 m³/s proyectado, siendo una disminución importante dentro de la subcuenca Putina.

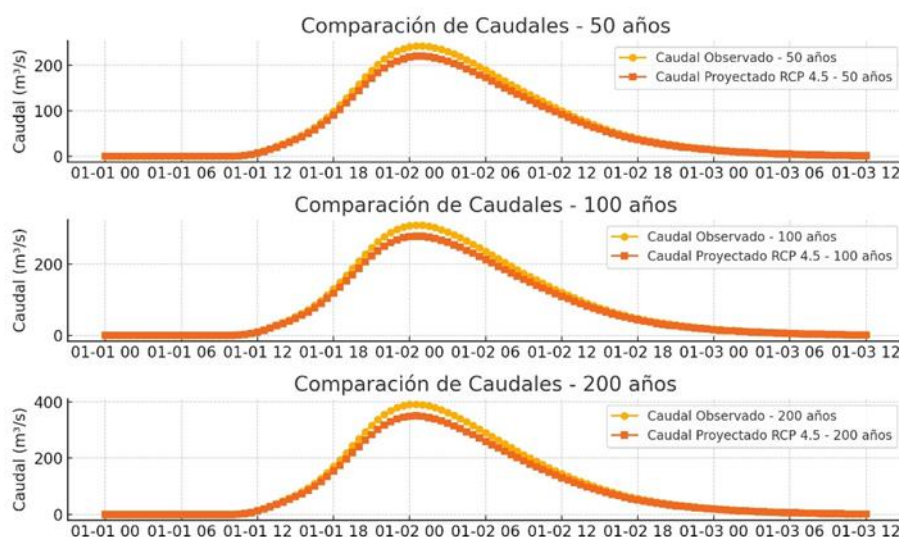
Periodo de retorno de 100 años: La tendencia de disminución continúa en todas las unidades hidrográficas, con reducciones significativas en los caudales proyectados, en cuestión de la subcuenca Putina, el caudal vario de un proyectado

en un escenario RCP4.5 de 279.2 m³/s, frente a los 310.10 m³/s observados mediante datos históricos. Esto indica que los eventos más extremos, con un periodo de retorno de 100 años, también podrían ser menos intensos bajo el escenario RCP 4.5, reflejando un cambio en los patrones de precipitación y escorrentía futuros.

Periodo de retorno de 200 años: En los eventos más extremos, como el de 200 años, se observa una reducción significativa en los caudales proyectados, especialmente en la unidad UH 1789, que pasa de 86.9 m³/s observado a 66.8 m³/s proyectado. La subcuenca Putina también muestra una reducción considerable, con un caudal proyectado de 350 m³/s en comparación con los 391.9 m³/s observados.

Figura 69

Comparación de hidrogramas para un escenario RPC 4.5 en un periodo de retorno de 50, 100 y 200 años

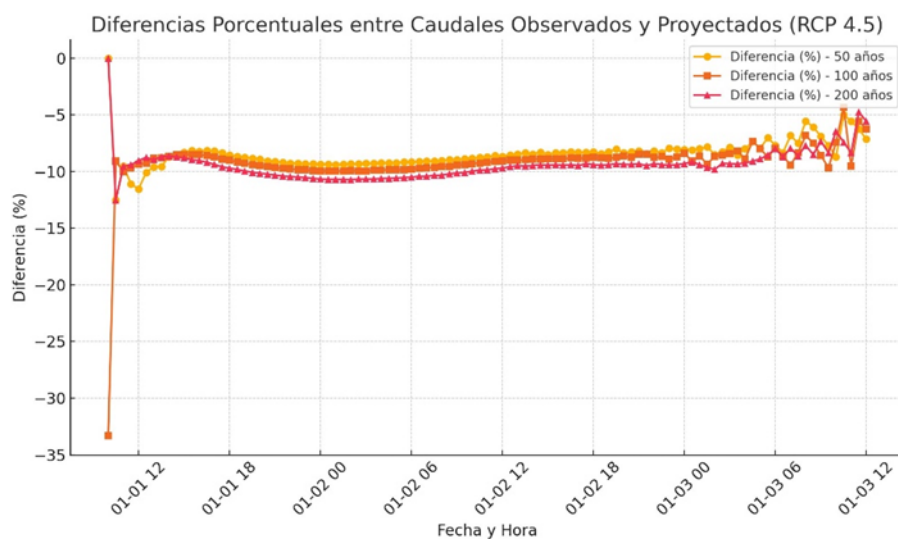


En cuestión a los hidrogramas de salida, para el periodo de retorno de 50 años, el caudal proyectado bajo el escenario RCP 4.5 es ligeramente menor que el

caudal observado en varios puntos del hidrograma, lo que sugiere un incremento en la intensidad de las precipitaciones extremas debido al cambio climático. Por otra parte, para el periodo de retorno de 100 años en este caso, se observa una diferencia más pronunciada entre el caudal proyectado y el observado, lo que implica que los eventos extremos para este periodo serán más severos bajo el escenario RCP 4.5. por último, en el periodo de retorno de 200 años, el caudal proyectado bajo el escenario RCP 4.5 muestra una diferencia significativa con respecto al observado, especialmente en los picos de caudal, lo que indica un fuerte incremento en la magnitud de los eventos extremos asociados a un periodo de retorno más largo.

Figura 70

Diferencia porcentual de hidrogramas en un escenario RPC 4.5



La diferencia entre los caudales observados y proyectados varía a lo largo del tiempo del modelamiento por el HEC HMS, reflejando tanto aumentos como disminuciones en los caudales máximos proyectados debido al cambio climático. Las diferencias son más pronunciadas para los periodos de retorno mayores (200 años), lo que indica que los eventos más extremos se ven más afectados por el

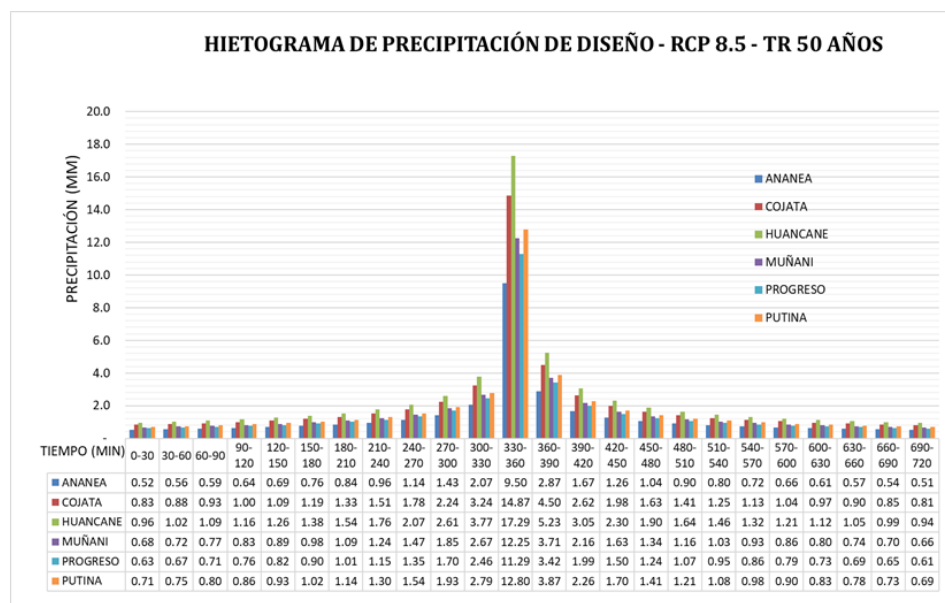
escenario RCP 4.5. Estas fluctuaciones en la diferencia indicarían la naturaleza no lineal del impacto del cambio climático en los patrones de escorrentía.

4.3.2. Escenarios bajo RCP 8.5 en el periodo 2023 – 2075

El escenario RCP 8.5 representa una trayectoria en la que las emisiones continúan aumentando sin medidas significativas de mitigación, este escenario implica altas concentraciones de CO₂ y otros GEI en la atmósfera, principalmente debido al uso continuo e intensivo de combustibles fósiles. Si se cumple este escenario, los impactos del cambio climático pueden ser más pronunciados para la subcuenca Putina, en el caso de las proyecciones de precipitación en dos modelos globales, indicarían una disminución de las precipitaciones máximas, lo que afectaría directamente a los cálculos en estudios sobre máximas avenidas y el valor de los caudales máximos, que nacen desde los datos de precipitación, como se muestran para nuestra subcuenca.

Figura 71

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 50 años



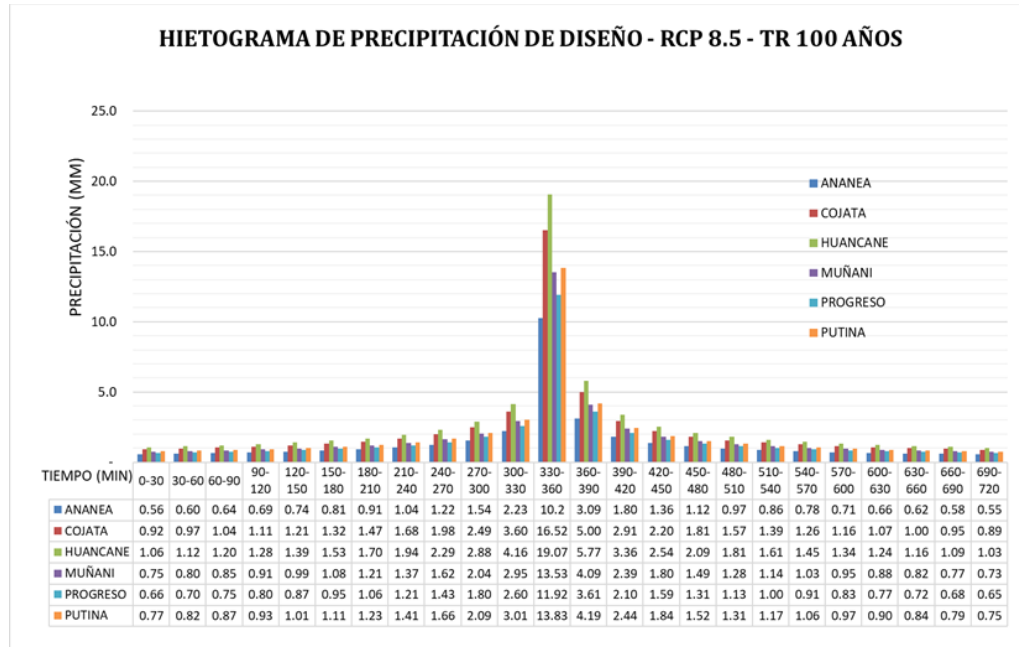


Al analizar los hietogramas proyectados bajo el escenario RCP 8.5 para un periodo de retorno de 50 años, en comparación con los hietogramas de la figura 20, se observa que la mayoría de las estaciones experimentan disminuciones leves en los picos de precipitación proyectados, con algunas excepciones. Por ejemplo, la estación Ananea muestra una disminución del 5.75%, pasando de 10.09 mm en el valor observado a 9.51 mm proyectado. De manera similar, la estación Cojata registra una reducción del 4.04%, pasando de 15.50 mm observado a 14.87 mm proyectado. Sin embargo, la estación Huancané presenta un aumento del 7.44%, con un valor proyectado de 17.29 mm, superior al valor observado de 16.09 mm. En Muñani, el valor proyectado es de 12.25 mm, lo que representa un incremento del 2.32% en comparación con los 11.97 mm observados. En contraste, la estación Progreso muestra una disminución del 6.79%, pasando de 12.11 mm observado a 11.29 mm proyectado bajo el escenario RCP 8.5.

Estos resultados sugieren una tendencia general de disminución en las precipitaciones máximas proyectadas bajo el escenario RCP 8.5, con algunas excepciones en estaciones clave como Huancané y Muñani. Esta variabilidad en las proyecciones refleja la complejidad de los patrones climáticos futuros, donde ciertas áreas pueden experimentar aumentos en la precipitación mientras que otras podrían ver una disminución, lo que influenciara en la determinación los caudales máximos mediante el HEC HMS.

Figura 72

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 100 años

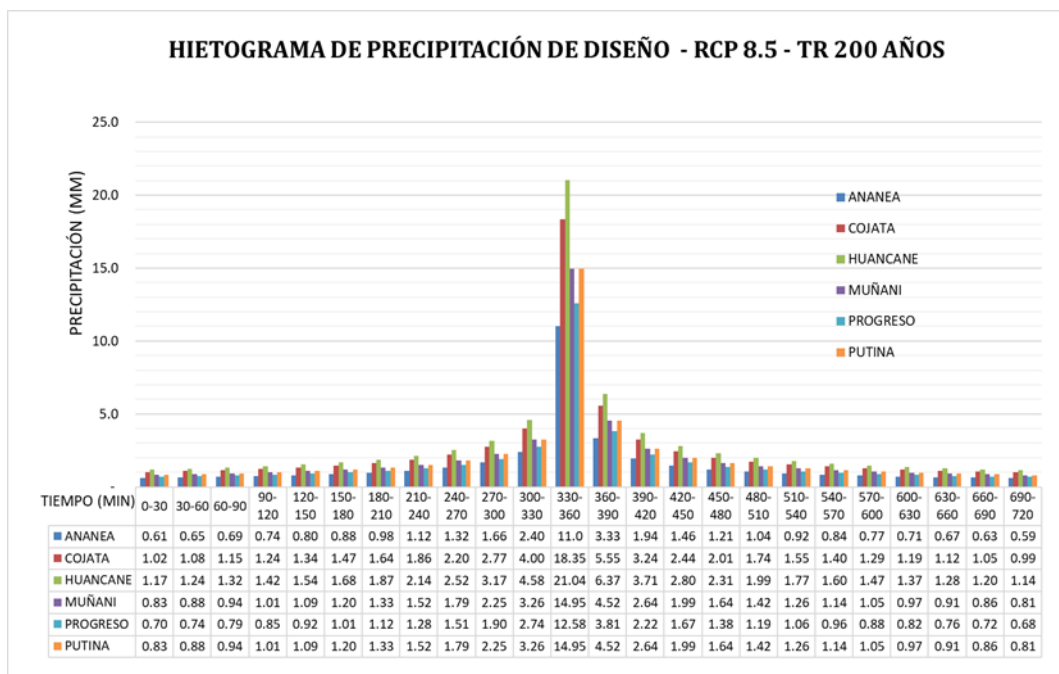


De la comparación con los hietogramas del primer objetivo en la figura 21, al analizar los hietogramas para un periodo de retorno de 100 años bajo el escenario RCP 8.5, se aprecia que varias estaciones experimentan disminuciones en comparación con los valores históricos. En la estación Ananea, la precipitación disminuye de 11.25 mm a 10.24 mm, lo que representa una reducción del 8.95%. En la estación Cojata, el valor proyectado es de 16.52 mm, una reducción del 5.60% en comparación con el valor observado de 17.50 mm. Por otro lado, en la estación Huancané, se proyecta un aumento del 8.63%, pasando de 17.56 mm a 19.07 mm. En la estación Muñani, el valor proyectado es ligeramente superior, con un incremento del 0.74% respecto al observado, de 13.43 mm a 13.53 mm. Finalmente, la estación Progreso muestra una disminución significativa del 8.23%, con una precipitación proyectada de 11.92 mm, frente a los 12.98 mm observados.

Estos resultados sugieren que, bajo el escenario RCP 8.5 para un periodo de retorno de 100 años, existe una tendencia general hacia la reducción de las precipitaciones máximas en la mayoría de las estaciones, con algunas excepciones, como es el caso de Huancané, donde se proyecta un aumento considerable.

Figura 73

Hietogramas de precipitación por GCM para un escenario RCP 8.5 en un periodo de retorno de 200 años



En cuanto al análisis comparativo de las precipitaciones pico para un periodo de retorno de 200 años bajo el escenario RCP 8.5, las estaciones muestran comportamientos mixtos. En la estación Ananea, el valor observado de 12.54 mm disminuye a 11.03 mm, lo que representa una reducción del 12.02%. De manera similar, en la estación Cojata, se proyecta una disminución del 7.14%, con un valor que pasa de 19.77 mm a 18.35 mm. En contraste, la estación Huancané presenta un incremento significativo del 9.82%, aumentando de 19.15 mm

observado a 21.04 mm proyectado. En la estación Muñani, el valor proyectado es ligeramente inferior, pasando de 15.07 mm a 14.95 mm, lo que implica una leve disminución del 0.81%. Finalmente, la estación Progreso muestra una reducción del 9.66%, con el valor proyectado de 12.58 mm frente a los 13.92 mm observados

Tabla 35

Comparación de caudales máximos para el escenario RCP 8.5, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años

Unidad Hidrografica	TR 50		TR 100		TR 200	
	OBS	RCP 8.5	OBS	RCP 8.5	OBS	RCP 8.5
UH 1789	55.2	51	68.2	64.1	86.9	71.8
UH 1788	96.5	95.9	119.5	119.5	147.5	147.2
UH 1786	110.2	103.8	141.1	129	178.4	158.9
UH 1787	9.4	9.2	11.6	11.6	14.3	14.5
UH 1785	4	3.9	5	5	6.2	6.2
Subcuenca Putina	242.8	230.9	310.1	298.1	391.9	356.8

De la tabla 35, se tienen los siguientes resultados:

Periodo de retorno de 50 años: En este periodo de retorno, los caudales proyectados bajo el escenario RCP 8.5 son ligeramente menores que los observados en casi todas las unidades hidrográficas de la subcuenca. Por ejemplo, en la unidad UH 1789, el caudal observado es de 55.2 m³/s, mientras que el proyectado es de 51 m³/s. mientras para el punto de delimitación de la Subcuenca Putina, el caudal máximo proyectado es de 230.9 m³/s, comparado con los 242.8 m³/s observados, lo que indica una reducción moderada en la magnitud de los eventos extremos.

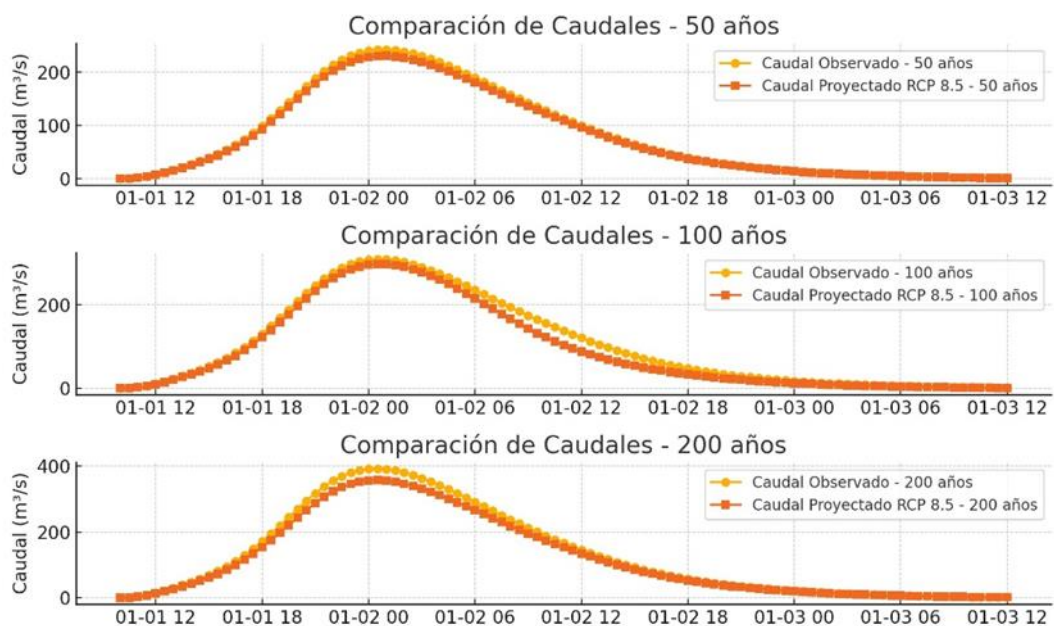
Periodo de retorno de 100 años: En este escenario, las unidades hidrográficas como UH 1788 presentan caudales proyectados similares a los

observados, lo que indica que, en ciertos puntos de la subcuenca, el cambio climático bajo RCP 8.5 podría tener menos impacto en los caudales. Por otra parte, en este periodo de retorno para la subcuenca Putina en su conjunto, el caudal observado es de 310.1 m³/s, mientras que el proyectado es de 298.1 m³/s, lo que muestra una disminución menor en comparación con el periodo de retorno de 50 años.

Periodo de retorno de 200 años: En este caso, los caudales proyectados son significativamente menores en las unidades hidrográficas más grandes, como UH 1786, donde el caudal proyectado es de 158.9 m³/s en comparación con los 178.4 m³/s observados. En la subcuenca Putina, el caudal máximo proyectado es de 356.8 m³/s, frente a los 391.9 m³/s observados, lo que indica una disminución considerable en la magnitud de los eventos más extremos.

Figura 74

Comparación de hidrogramas para un escenario RPC 8.5 en periodos de retorno de 50, 100 y 200 años



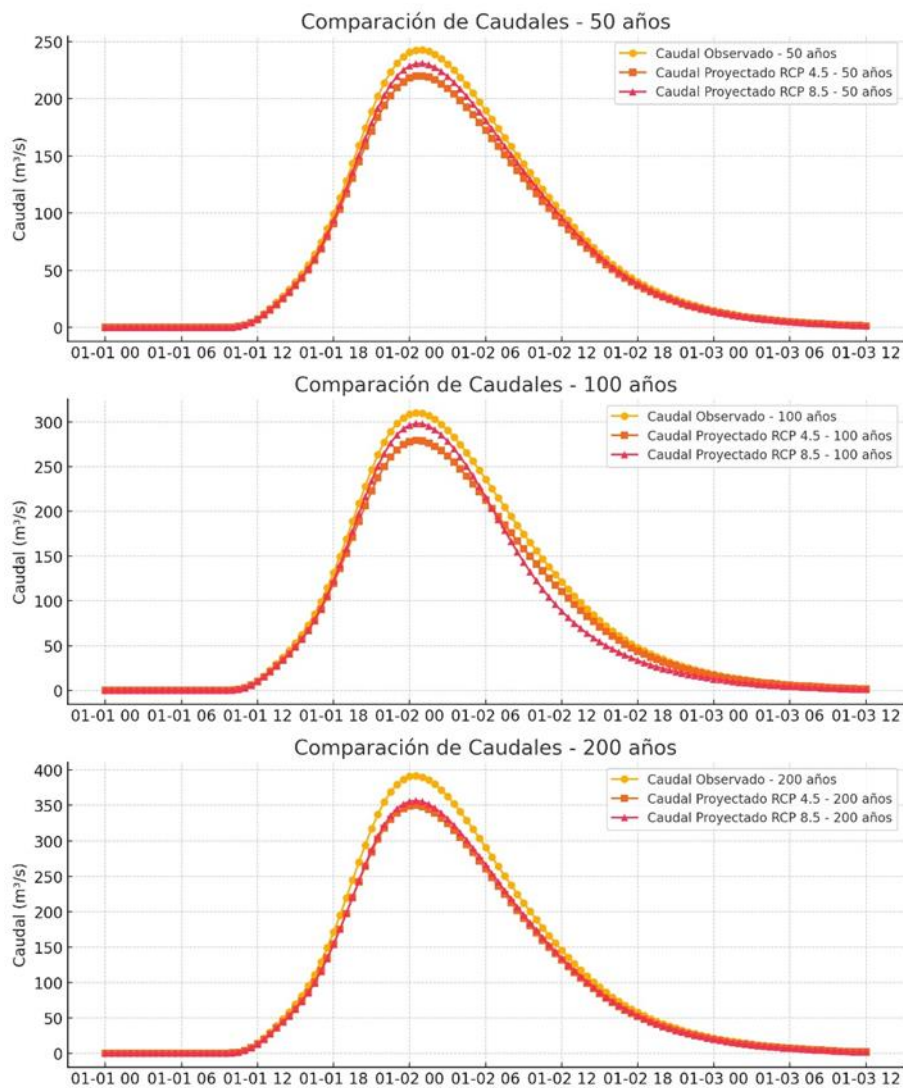


Por otro lado, de los hidrogramas de la figura 74, en la comparación del periodo de retorno de 50 años el hidrograma proyectado bajo RCP 8.5 es ligeramente menor que el observado en algunos momentos del evento, lo que indica que los caudales máximos podrían no ser tan severos como los observados en ciertos escenarios. En el periodo de retorno de 100 años, se observa una mayor diferencia entre los caudales proyectados y observados, donde el escenario RCP 8.5 proyecta caudales más bajos. Por su lado en el periodo de retorno de 200 años, la diferencia es aún más pronunciada, con caudales proyectados más bajos que los observados.

Esto implica que, en el escenario RCP 8.5, los eventos más extremos (como los de 200 años) podrían ser menos intensos de lo que sugieren los datos históricos, por lo que del análisis de los hidrogramas sugiere que bajo el escenario RCP 8.5, los caudales máximos proyectados tienden a ser más bajos que los caudales observados, lo que podría indicar una disminución en la magnitud de los eventos extremos en este escenario.

Figura 75

Comparación de hidrogramas en escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5



De la comparación de los hidrogramas observados en la figura 75, se detalla:

Periodo de 50 años: Los caudales bajo RCP 4.5 son ligeramente mayores que los observados, lo que refleja un aumento en la frecuencia y severidad de los eventos. En el caso de RCP 8.5, los caudales proyectados tienden a ser más bajos que los observados, mostrando una posible reducción en la magnitud de los eventos más frecuentes.



Periodo de 100 años: La diferencia entre los caudales proyectados bajo RCP 4.5 y los observados es más pronunciada, con mayores caudales bajo RCP 4.5. En RCP 8.5, se observa una mayor disminución, lo que indica que el cambio climático podría reducir los caudales para eventos de retorno de 100 años.

Periodo de 200 años: La tendencia es similar: RCP 4.5 proyecta eventos más extremos con caudales más altos que los observados, mientras que RCP 8.5 reduce significativamente los caudales proyectados en comparación con los observados, lo que indica una menor intensidad de eventos extremos bajo este escenario.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN BASE A LOS OBJETIVOS

Del objetivo: “Analizar la situación actual de los caudales máximos de la subcuenca Putina en relación con la precipitación, utilizando datos históricos observados”.

Los datos históricos de precipitación y caudales simulados en este estudio muestran una notable consistencia con los hallazgos previos, como el estudio de Carcasi (2021), quien utilizó datos de precipitación diaria para obtener un caudal máximo de 445.95 m³/s para un periodo de retorno de 100 años en la subcuenca del río Putina. Sin embargo, nuestro análisis basado en el modelo hidrológico HEC-HMS y una serie histórica más amplia (1970-2022) arrojó caudales menores para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años (242.80 m³/s, 310.10 m³/s, y 391.90 m³/s, respectivamente). Esta diferencia puede deberse a la aplicación de técnicas más actualizadas para la homogeneización de datos y la integración de una mayor cantidad de estaciones de precipitación, lo que permitió una mejor representación espacial y temporal de los datos.



En relación con el estudio de Condori (2017), que estimó un caudal de 237.94 m³/s, la diferencia de 72.16 m³/s con nuestro estudio podría estar vinculada al menor periodo de observación de 38 años y al uso de un método empírico de transformación de lluvia a escorrentía (hidrograma unitario triangular). Esta comparación resalta la importancia de utilizar un periodo de datos más extenso y un enfoque de modelado más detallado para obtener estimaciones más precisas de los caudales máximos.

En comparación con el estudio realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2010), que también evaluó caudales en la cuenca Huancané mediante el hidrograma unitario del SCS, los resultados de este trabajo son coherentes, aunque los valores obtenidos mediante el modelo HEC-HMS muestran una mayor variabilidad debido a la actualización de los periodos de análisis y la inclusión de proyecciones climáticas. Este estudio aporta nueva información sobre la evolución de los caudales en función de escenarios climáticos, lo cual no fue considerado en las evaluaciones previas.

Del objetivo: “Seleccionar y aplicar modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 para obtener proyecciones de cambios en la precipitación bajo diferentes escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) en la subcuenca del río Putina”.

El análisis de 18 modelos climáticos, con la selección del MIROC5 como el de mejor desempeño para la subcuenca del río Putina, está en línea con estudios nacionales e internacionales. Por ejemplo, Pino et al. (2022) también emplearon un enfoque basado en múltiples modelos climáticos globales, concluyendo que el MIROC5 era adecuado para evaluar la precipitación y los caudales en la región de Tacna. En este estudio, se confirmó la validez del MIROC5 para la subcuenca Putina, destacando su capacidad para capturar tanto el régimen de precipitación histórica como las proyecciones bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



Por otra parte, nuestro estudio, se observó que bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, la precipitación anual disminuye entre -5.6% y -8.7%, lo que coincide con el análisis de Huarahuara (2022), que detectó una disminución de precipitaciones en las estaciones de Muñani y Putina. Asimismo, los resultados de nuestro estudio son consistentes con los hallazgos de Lujano et al. (2016), quienes proyectaron una disminución de la precipitación en el altiplano bajo el escenario RCP 4.5.

Estos resultados confirman una tendencia hacia la reducción de la precipitación en la subcuenca Putina, lo que sugiere un impacto significativo en la disponibilidad hídrica y refuerza la relevancia de la selección cuidadosa de modelos climáticos para evaluar los escenarios futuros. Este trabajo aporta información nueva al vincular de manera más directa los resultados de los GCM con las características hidrológicas locales, un enfoque menos explorado en estudios anteriores.

Del objetivo: “Simular el comportamiento de los caudales máximos en la subcuenca del río Putina bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos futuros 2025-2075, mediante el modelo hidrológico HEC HMS”

Los caudales máximos proyectados para la subcuenca Putina bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 sugieren una disminución general en comparación con los valores observados. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 50 años, los caudales proyectados en RCP 4.5 y RCP 8.5 fueron de 220 m³/s y 230.9 m³/s, respectivamente, en contraste con los 242.8 m³/s observados. Estos resultados se alinean parcialmente con estudios internacionales, como el de Hidalgo et al. (2021) en Costa Rica, donde también se proyectó una reducción en la esorrentía futura bajo escenarios pesimistas. Estas tendencias también son coherentes con el estudio de Laura (2019), quien identificó un descenso en la oferta hídrica anual bajo el escenario RCP 4.5. Sin embargo, nuestro



estudio contrasta con este trabajo al proyectar una disminución continua de caudales, incluso bajo RCP 8.5, lo que podría reflejar particularidades locales en la subcuenca Putina en comparación con otras cuencas del altiplano.

Los resultados obtenidos en este objetivo son también comparables con los hallazgos de Lujano et al. (2016), quienes predijeron una disminución de la precipitación bajo RCP 4.5, correlacionada con una disminución en los caudales proyectados. La diferencia en los caudales proyectados entre los dos escenarios climáticos sugiere que, bajo condiciones de emisiones más altas (RCP 8.5), la reducción de caudales podría ser menor en comparación con RCP 4.5, aunque ambos escenarios apuntan a una tendencia hacia caudales máximos menores en el futuro.

Sin embargo, a diferencia de estudios que proyectan aumentos en los caudales máximos, como el trabajo de Díaz et al. (2018) en la cuenca del río Lurín, donde se espera un aumento del 10% bajo el escenario RCP 8.5, este estudio aporta nueva evidencia sobre la disminución de los caudales máximos en el altiplano peruano, lo que podría deberse a factores locales como la altitud y la variabilidad climática de la región.

V. CONCLUSIONES

PRIMERA: El análisis realizado sobre la información histórica de las precipitaciones diarias en el período 1970-2022 permitió identificar y corregir anomalías en algunas estaciones, asegurando la homogeneidad y consistencia de los datos. Este proceso fue crucial para el desarrollo del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas anuales y para estimar los caudales máximos en la subcuenca del río Putina. Los resultados obtenidos con el modelo hidrológico HEC-HMS, utilizando datos observados, mostraron caudales máximos de 242.8 m³/s para un periodo de retorno de 50 años, 310.10 m³/s para 100 años y 391.90 m³/s para 200 años. Estos valores subrayan la relación directa entre la precipitación y los caudales máximos, destacando la necesidad de considerar la precipitación histórica como un factor clave en cuencas que no cuentan con la información hidrométrica.

SEGUNDA: En cuanto a la proyección de cambios climáticos, el modelo MIROC5 se identificó como el más adecuado para la subcuenca, tras analizar 18 GCMs bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados sugieren que, bajo el escenario RCP 4.5, se espera una disminución en la precipitación anual en todas las unidades hidrográficas, con variaciones entre -5.6% y -8.0%. Para el escenario RCP 8.5, las reducciones proyectadas son aún mayores, entre -6.2% y -8.7%, lo que refleja un impacto más significativo en los recursos hídricos de la subcuenca, esta tendencia a la disminución de precipitaciones implicaría una posible reducción en la disponibilidad hídrica.

TERCERA: El modelamiento hidrológico de los caudales máximos proyectados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 mostró que los caudales futuros serán menores en comparación con los caudales observados históricamente, especialmente en los eventos de mayor magnitud. Para un periodo de retorno de 50 años, los caudales proyectados bajo RCP 4.5 (220 m³/s) y RCP 8.5 (230.9 m³/s) son moderadamente inferiores a los 242.8 m³/s observados. Para 100 años, las reducciones son más evidentes, con un caudal proyectado de 279.2 m³/s en RCP 4.5 y 298.1 m³/s en RCP 8.5, frente a los 310.10 m³/s observados. Finalmente, para 200 años, los caudales proyectados disminuyen significativamente, alcanzando 350 m³/s en RCP 4.5 y 356.8 m³/s en RCP 8.5, mientras que el caudal observado fue de 391.9 m³/s. Estos resultados destacan que, bajo ambos escenarios climáticos, se proyecta una disminución general de los caudales máximos en la subcuenca Putina, lo que refleja la influencia del cambio climático sobre la intensidad de los eventos extremos.

CUARTA: Finalmente, es importante destacar que los resultados obtenidos a través de modelos climáticos contienen cierta incertidumbre, debido a los supuestos inherentes a las proyecciones. No obstante, los hallazgos sugieren la necesidad de adoptar medidas de mitigación y adaptación frente a la posible disminución de los caudales máximos en el futuro, la gestión de los recursos hídricos deberá incorporar enfoques integrales que contemplen tanto los cambios históricos como las proyecciones climáticas, con el objetivo de asegurar una gestión adecuada del agua en la subcuenca del río Putina frente a los desafíos climáticos futuros.

VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda la ampliación de estudios con modelos climáticos y escenarios futuros, aunque el modelo MIROC5 demostró ser el más adecuado en esta investigación, sería recomendable en futuras investigaciones utilizar otros modelos climáticos globales de alta resolución que puedan proporcionar proyecciones más detalladas. Esto permitirá tener una visión más integral de las posibles variaciones climáticas en la región. Asimismo, se podrían explorar nuevos escenarios de cambio climático como el CMIP6, los cuales incluyen mejores representaciones de los procesos atmosféricos y de retroalimentación.

SEGUNDA: Implementación de medidas de adaptación, debido a que los resultados muestran una reducción en los caudales máximos futuros, lo que sugiere la necesidad de medidas de adaptación. Se recomienda la optimización de la infraestructura hidráulica existente y la planificación de nuevas infraestructuras para gestionar caudales menores, pero con eventos extremos más intensos y variables. Esto incluye la mejora de los sistemas de drenaje y la construcción de embalses y reservorios que permitan almacenar agua en épocas de mayor precipitación.

TERCERA: Investigación futura en eventos extremos, este estudio mostró la necesidad de comprender mejor los eventos extremos de precipitación y caudal bajo los escenarios de cambio climático. Se recomienda profundizar en el análisis de la frecuencia y magnitud de estos eventos en el futuro, mediante el uso de modelos estadísticos avanzados que simulen condiciones extremas de escorrentía y caudal.



CUARTA: Por último, se recomienda un fortalecimiento de las políticas de gestión del agua, debido a que los hallazgos sobre la disminución de caudales en escenarios futuros requieren un enfoque preventivo en la formulación de políticas públicas, que deben priorizar la gestión integral de los recursos hídricos. Es recomendable fortalecer la colaboración entre las autoridades locales y regionales para implementar estrategias de uso sostenible del agua, que incluyan la mejora en el uso eficiente de los recursos hídricos disponibles.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeyeri, E., O., Ayeni, & O.O. (2020). Statistical downscaling of climate variables and hydrological modeling in the Ogun-Osun River Basin, Nigeria. *Environmental Processes*, 7(1), 181-200.
- Ahmed, K. &. (2020). Hydrologic modeling of rainfall-runoff relationships in small watersheds using HEC-HMS. *Journal of Hydrology and Environment Research*, 12(1), 55-67.
- Alberdi, V., Moral, F., Rebollo, F., Paniagua, L., Garcia, A., Aguirado, C., & Honorio, F. (2022). *Nueva base de datos de precipitaciones y temperaturas para Extremadura en el periodo (1989-2018)*. Badajoz-España: Universidad de Extremadura.
- Alvarado Gacia, V. (2020). *Modelación hidrológica del río Torres, San José, Costa Rica su variación con respecto al cambio climático*. Costa Rica: Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza.
- Amador, J. A., & Alfaro, E. J. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *REVIBEC-REVISTA IBEROAMERICANA DE ECONOMÍA ECOLÓGICA*, 39-52.
- Amblar Francés, P., Casado Calle, M. J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P., & Rodríguez Camino, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. España: Agencia Estatal de Metereología.
- ANA. (2010). *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Huancané y Suches: Estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches*. Lima: ANA.
- Andrade Velásquez, M., & Montero Martinez, M. J. (2019). Fiabilidad de los modelos del CMIP5 para la cuenca del río Usumacinta bajo el método REA. *Digital Ciencia@ UAQRO*, 2(2), 14-21.
- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: EDITORIA LIMUSA S.A.



- Azorin Molina, C., Guijarro, J., McVicar, T., Vicente Serrano, S., Chen, D., Jerez, S., & Espirito, F. (2016). Tendencias de las ráfagas de viento máximas diarias en España y Portugal, 1961-2014. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121 (3), 1059-1078. doi: <https://doi.org/10.1002/2015JD024485>
- Barros, V. (2004). *Cambio climático global*. Buenos Aires: Libros del zorzal.
- Blázquez, J. (2011). *Proyecciones climáticas sobre Sudamérica utilizando modelos climáticos globales. Análisis de incertidumbres*. Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Bonilla Ovallos, C. A., & Mesa, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107-118.
- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de Hidrología CIV-233*. Cochabamba - Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- Carcasi Chambi, A. (2021). *Modelamiento Hidrológico del río Putina, para localizar las zonas con riesgo de inundación, empleando el software HEC-RAS en la ciudad de Putina -Puno*. Juliaca: Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez.
- Casado Calle, M. J., Martín Herreros, J. M., Pastor Saavedra, M. A., & Rodríguez Camino, E. (2011). *Evaluación de los modelos climáticos globales participantes en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC sobre España y la región euroatlántica*. España : Agencia Estatal de Meteorología.
- Chávez, R., Saito, L., & Quiroz, R. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre el régimen hidrológico de la cuenca del río Jequetepeque. *Revista Tecnológica-ESAN*, 9(17), 23-31.
- Chetyrina, A. (2017). *Análisis y determinación de las curvas IDF en Navarra*. España: Universidad Pública de Navarra.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogota - Colombia: McGRAW-HILL.



- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., Gonzales, J., Reynero, M., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión Hídrica Principios y Técnicas de manejo*. Cordoba - Argentina: UniRio Editora.
- Climaticos, G. I. (1992). *Cambio Climatico: Las evaluaciones de IPCC de 1990 y 1992*. Canadá: Organizacion Metereológica Mundial - Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente.
- Condori Quilca, R., & Itusaca Anahua, P. (2017). *Analisis comparativo del diseño estructural de alternativas de puentes urbanos para los barrios Union Putina y Libertad de la localidad de Putina*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Díaz, J. A., Mendoza, P. A., & Ramos, E. A. (2018). Impacto del cambio climático en los caudales extremos de la cuenca del río Lurín. *Revista Peruana de Investigación en Ciencias e Ingeniería*, 2(1), 39-46.
- Duque Sarango, P., Patiño, D., & López, X. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información tecnológica*, 30(6), 351-362.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Zaragoza: World Water Assessment Programme.
- Feijó U., F., & Valdiviezo Ch., K. (2006). *Manual de Operacion, Mantenimiento y Transferencia de los Sistemas de Información Geográfica - SIG*. Loja - Piura: Proyecto Binacional Cantamayo - Chira.
- Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C., & Trejo Vázquez, R. I. (2014). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. Mexico: Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.
- Gaertner, M. :, & Castro, M. (2012). Escenarios regionales de cambio climático. *Temas de Física*, 26(2), 1-8.
- Gámez Morales, W. R. (2010). *Texto Básico de Hidrología*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.



- Gao, H., Zhang, Z., Hao, Y., & Guo, S. (2020). Impacts of climate change on river flows in the Yangtze River Basin. *Water*, *12*(1), 171.
- Garcés Gálvez, J. J. (2022). Efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de downscaling estadístico. *Revista Geográfica*, (164), 13-20. doi:<https://doi.org/10.35424/regeo.164.2022.1039>
- García F., W., Delfín S., M., & Mauricio, A. A. (2017). Escenarios de cambio climático y sistematización de tecnologías campesinas e innovaciones tecnológicas contra las heladas. *Acta Nova*, *8*(2), 186-204.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Buenos Aires - Argentina: Editorial de la Universidad de la Plata.
- Gómez Estupiñán, D., & Rodríguez Buitrago, A. (2018). *Aplicabilidad de datos climatológicos escalados para la modelación hidrológica de la cuenca del río Tona en Santander*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. (2000). *Informe Especial del IPCC Escenarios de emisiones*. Cambridge INGLATERRA: OMM.
- Gudmundsson, L., J.B., B., J.E., H., & Engen Skaugen, T. (2012). Reducción de la precipitación de RCM a la escala de la estación utilizando transformaciones estadísticas – una comparación de métodos. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(9), 3383-3390.
- Guijarro, J. A. (2019). *Homogenización de series climáticas con Climatol*. España: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. en Islas Baleares, España.
- Güldal, H., & Kurtuluş, B. (2020). Application of Snyder synthetic unit hydrograph in ungauged basins. *International Journal of Hydrology*, *4*(3), 79-85.
- Gutiérrez Caiza, C. (2014). *Hidrología Básica y Aplicada*. Quito - Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala.



- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Perez Briceño, P. M. (2021). Cambios climáticos proyectados de modelos CMIP5 en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69, 60-3.
- Huarahuara Condori, L. L. (2022). *Efectos del cambio climático sobre la temperatura y precipitación en la cuenca hidrográfica Huancane - Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Huerta, A., & Lavado, W. (2021). *Atlas de producción de agua en el Perú: una evaluación presente y futura con énfasis en las cuencas de aporte de la EPS*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú.
- Ingol Blanco, E. (2016). *Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando Hec-GeoHMS aplicación a la Cuenca del Río Chilca*. Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- La Cruz, R. M., Espinoza, L., Lavado, W., Gutiérrez, V., & Campos, Y. (2019). Proyección de caudales extremos en la cuenca del río Chancay-Lambayeque bajo escenarios de cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, (21), 89-102.
- Largo, M., Lindsay, K., Moore, J., & Doney, S. (2013). Captación y almacenamiento de carbono oceánico en el siglo XX en CESM1 (BGC). *Diario del Clima*, (26), 6775-6800.
- Larios Tlali, H., Torres Benites, E., Quevedo Nolascol, A., Martínez Menes, M., & Salgado Transito, J. (2015). Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(3). *Tecnología y ciencias del agua*, 39-56.
- Laura Santos, J. W. (2019). *Efecto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave - Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Lavado, C., & Espinoza, J. (2014). Variabilidad en los caudales máximos en los ríos andinos del sur del Perú. *Hidrología Andina*, 19(2), 21-32.
- Lee, H. K. (2019). Hydrological model calibration using observed and synthetic data in ungauged basins. *Hydrology Research* 50(4), 1052-1065.



- León Ochoa, R. F., Portuguese Maurtua, D. M., & Chávarri Velarde, E. A. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura-Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 182-193.
- Li, H., Wang, J., & Liu, Z. (2020). Evaluation of climate models in simulating extreme precipitation and temperature over China. *International Journal of Climatology*, 40(6), 3040-3056.
- Linares Humpiri, F. A. (2020). *Efectos del cambio climático en el régimen hidrológico de los caudales de la cuenca del río Lampa*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Linsley Kohler, P. (1975). *Hidrología para ingenieros*. U.S.A.: McGraw-Hill .
- Lizárraga Mogollón, J. L., Chávez Jiménez, A. C., Vargas Vera, M., & Angulo Machuca, M. (2020). Impact of climate change on hydrological processes in the Santa River Basin, Cordillera Blanca, Peru . *Science and Pollution Research*, 27(20), 25049-25063.
- Llamocca Huamani, J. (2022). Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú. *Revista Geográfica*, (164), 99–111. doi:<https://doi.org/10.35424/regeo.164.2022.1085>
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., & Gimena, F. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, (12), 15-30.
- Lujano Laura, E., Hidalgo Sanchez, L., Tapia Aguilar, B., & Lujano Laura, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 18(2), 195 - 204.
- Magrin, G., Marengo, J., & Vicuña, S. (2014). Impacts of climate change in the Latin American region. *IPCC Report*.



- Mamani Mamani, L. M. (2020). *Modelación hidrológica e hidráulica bidimensional del río Cabanillas Tramo Puente - Bocatoma Cabanilla, utilizando el modelo HEC RAS*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Manzanilla Quiñones, R., Jiménez Pérez, J., Treviño Garza, A., & Yerena Yamallel, R. (2018). Impactos del cambio climático en la seguridad hídrica y la gestión de recursos hídricos. *Revista de Gestión Hídrica*, 30-45.
- Manzanilla Quiñones, U. A., Jiménez Pérez, J., Treviño Garza, E. J., & Yerena Yamallel, J. I. (2018). Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para tres áreas naturales protegidas en el Eje Neovolcánico Transversal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 514-537.
- Marin Guzmán, A. (2023). Caracterización del comportamiento futuro de la precipitación asociado al fenómeno de cambio climático en el área de producción hidroeléctrica embalse Arenal, Costa Rica. *Revista Geográfica*, (166), 69-92.
- Marufi, M., & Sa'adi, Z. (2021). An improved approach to Clark unit hydrograph modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 145-158.
- McCuen, R. H. (2005). *Hydrologic Analysis and Design* (3ra ed.). Prentice Hall.
- Mejia, J., Valderrama, D., & Giler, A. (2022). Homogeneización de Datos Hidrometeorológicos con Climatol en la Cuenca del Río Portoviejo. *Domino de las Ciencias*, 8(2), 782-799.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- MTC. (2011). *Manual de Hidrologia, Hidraulica y drenaje*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Nania Escobar, L. S. (2007). *Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*. Granada: Universidad de Granada.
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (2015). Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.



- Parrado Montes, M., & Vivas Díaz, N. (2018). *Parrado Montes, M. L., & Vivas Díaz, N. A. (2018). Análisis comparativo de caudales máximos en un multiescenario de cambio climático en la cuenca del río blanco-negro-Guayuriba, Meta*. Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Paz Pellat, F. (2009). Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*, 43(5), 521-528.
- Pérez, J., & Campos, R. (2020). Evaluation of rainfall-runoff modeling in the upper watersheds of Andean basins. *Environmental Engineering Journal*, 13(4), 325-335.
- Pino Vargas, E., Chavarri, E., Ingol Blanco, E., Mejia, F., Cruz, A., & Vera Mamani, A. A. (2022). Impacts of climate change and variability on precipitation and maximum flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1), 10.
- Reyes Trujillo, A. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Cali - Colombia: Universidad de Valle.
- Rincón Ortiz, J. C., Pérez, M., Delfín, G., & Freitez, C. M. (2017). Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. *Gaceta Técnica*, 17(1), 9-28.
- Romero, G. J., & Martínez, P. (2021). GIS-based flood risk assessment in Andean watersheds. *Journal of Water Resource Management*, 123-140.
- Ruiz, R., & Torres, H. (2008). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*. Barcelona: Union Internacional para la Conservacion de la Naturaleza - UICN SUR.
- Santos Villar, D. (2016). *Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Sardon Quispe, H. M. (2021). *Análisis de sequías con perspectivas de cambio climático en la Unidad Hidrográfica Huancané, en el período 2020 - 2100*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

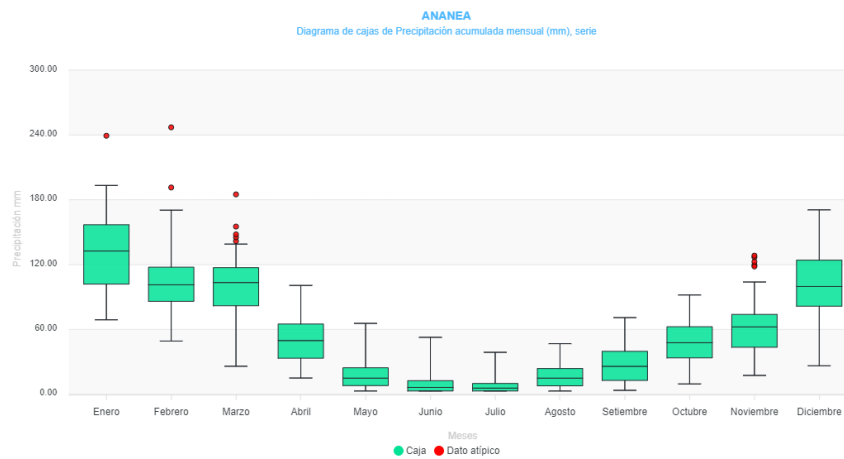
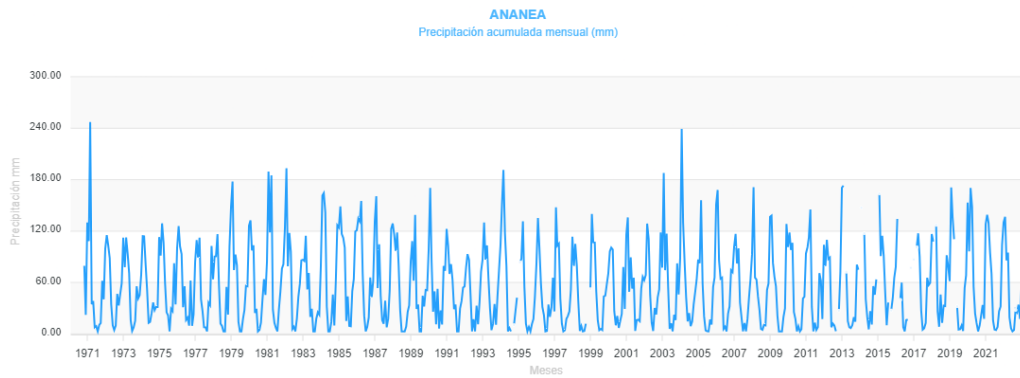


- Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (62), 169-183.
- Singh, V. R., & Singh, R. (2018). Spatial and temporal variation of rainfall using HEC-HMS: Case study in Himalayan basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 22(9), 1309-1324.
- Smith Quintero, R., & Campuzano Ochoa, C. (2000). *Análisis exploratorio para la detección de cambios y tendencias en series hidrológicas*. Medellín - Colombia: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Sun, Y. Z. (2019). Flood simulation and validation using HEC-HMS model in river basins of Southeast Asia. *Natural Hazards Research*, 7(1), 45-60.
- Varas C., E., & Bois, P. (1998). *Hidrología Probabilística*. Chile: Universidad Católica de Chile.
- Vargas M., R., & Granados O., M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia*. Colombia: Universidad de los Andes Santa Fe de Bogotá D.C. Colombia.
- Villon Bejar, M. (2002). *Hidrología*. Cartago - Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Villón Béjar, M. (2006). *Hidrología estadística - 1edición*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094.
- Zhao, Y. W. (2021). Flood risk prediction using synthetic hydrograph modeling: A case study in riverine basins. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

ANEXOS

ANEXO 1. Análisis exploratorio de datos observados

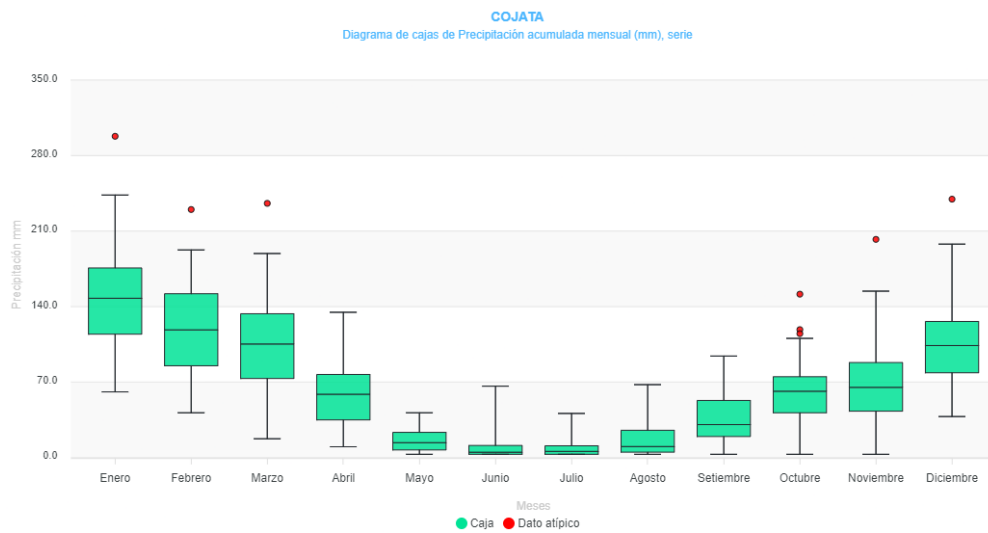
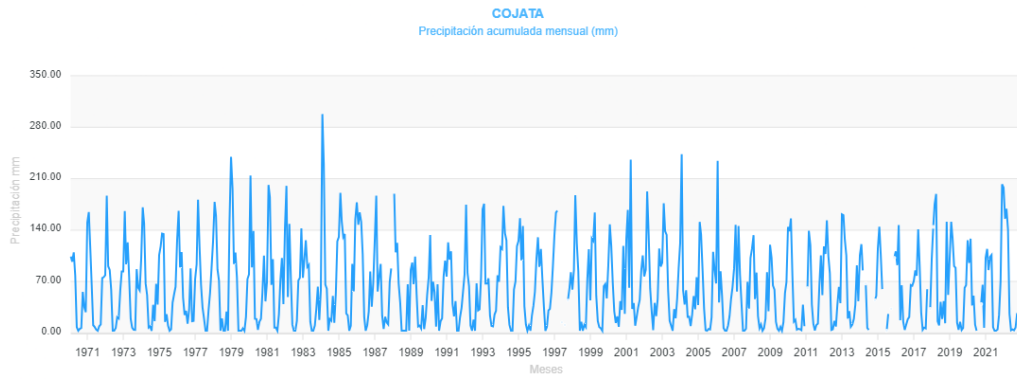
ESTACION ANANEA



Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	68.9	49.2	25.9	15	3	3	3	3	3.6	9.5	17.4	26.3
1er cuartil	101.95	86	81.91	33.35	8	3	3	7.8	12.8	33.65	43.5	81.5
Mediana	132.6	101.3	103.4	49.7	14.9	6.3	5.66	14.9	25.85	47.7	62.3	99.75
Promedio	130.06	106.63	99.49	51.29	17.68	10.8	8.93	16.77	28.45	49.62	62.72	100.21
3er cuartil	156.9	117.65	117.21	65	24.5	12.55	9.96	23.81	39.7	62.5	73.9	124.1
Rango intercuartil	54.95	31.65	35.3	31.65	16.5	9.55	6.96	16.01	26.9	28.85	30.4	42.6
Máximo	239.3	247.11	185	100.7	65.6	52.7	38.8	46.8	70.9	91.9	128.3	170.7
N° de datos	51	48	52	51	52	52	52	50	50	52	51	50
Medcouple	-0.15	0.07	-0.22	0.07	0.19	0.4	0.46	0.1	0.1	0.12	-0.1	0.03
Límite inferior	-46.45	48.58	-47.29	-3.81	-4.73	-0.53	0.9	-9.42	-15.44	5.22	-25.07	22.95
Límite superior	206.17	179.97	141.47	127.82	77.42	83.5	75.12	58.93	100.38	132.44	105.81	194.72
N° datos atípicos	1	2	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0



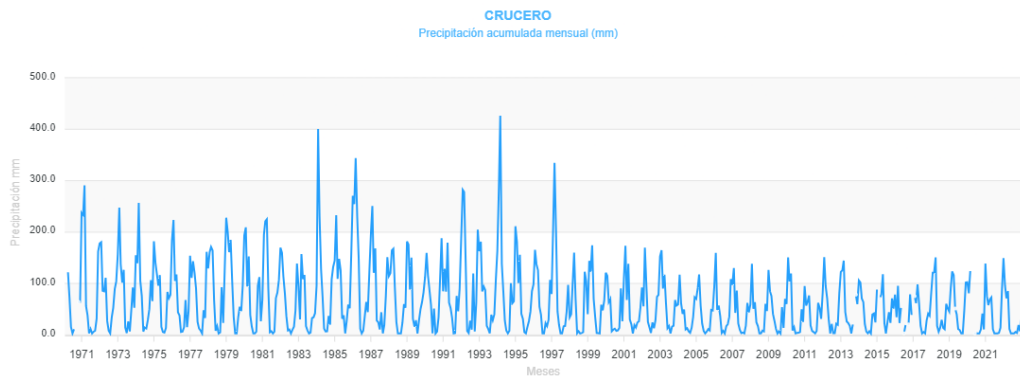
ESTACION COJATA



Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	60.9	41.5	17.4	10	3	3	3	3	3	3	3	38
1er cuartil	114.4	85.1	73.3	34.9	7.05	3	3	5	19.51	41.5	43	78.6
Mediana	147.7	118.4	105.3	58.7	13.8	4.95	5.7	10.2	30.55	61.5	65.1	103.85
Promedio	149.32	116.25	104.83	59.04	16.01	10.66	8.39	16.88	35.93	62.43	69.38	108.05
3er cuartil	175.8	151.9	133.35	77.06	23.35	11.2	10.9	25.3	52.95	74.95	88.1	126.2
Rango intercuartil	61.4	66.8	60.05	42.16	16.3	8.2	7.9	20.3	33.44	33.44	45.1	47.6
Máximo	297.9	230	235.7	134.7	41.5	66.2	40.9	67.6	94.1	151.5	202.3	239.6
N° de datos	53	53	51	51	52	52	51	49	52	51	53	50
Medcouple	-0.01	-0.09	-0.06	-0.01	0.19	0.74	0.36	0.56	0.24	-0.07	0.11	0.05
Límite inferior	17	-56.24	-42.59	-31.18	-5.35	2.08	-0.37	0.71	-1.93	-23.82	-3.03	18.24
Límite superior	263.5	226.06	205.6	137.9	76.47	250.5	60.72	311.3	185.55	114.77	193.14	212.71
N° datos atípicos	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	1	1



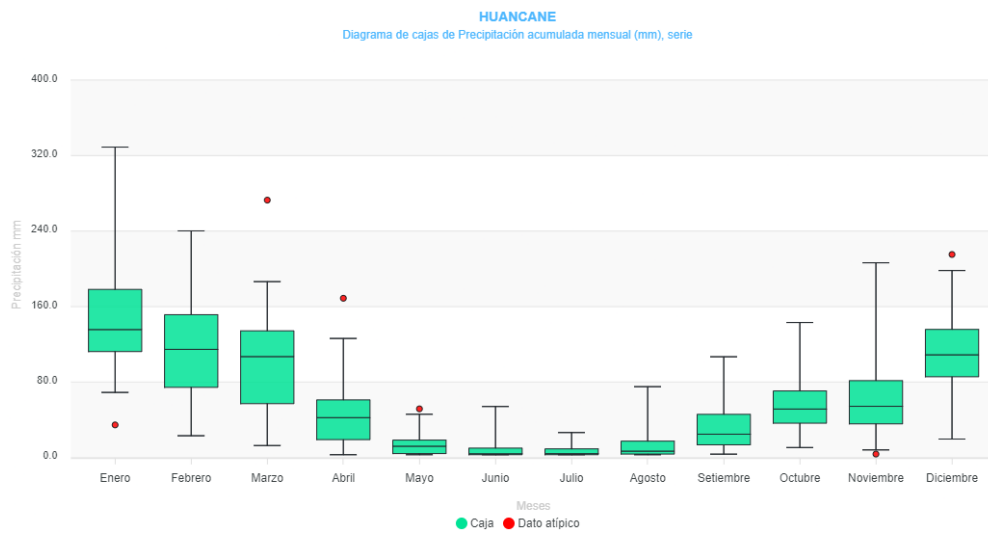
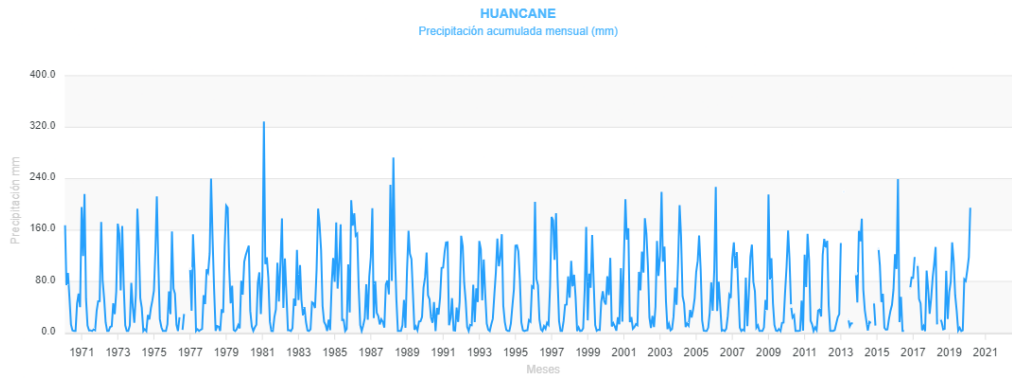
ESTACION CRUCERO



Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	30.2	43	23.2	7.1	3	3	3	3	3.1	13.6	7.2	30.6
1er cuartil	106.5	80	78	27.8	7.75	3	3	3.65	14.8	40.1	47.5	83.65
Mediana	151	111.6	112.5	51.95	14.8	5.8	3	8.1	24.3	49.8	73.3	113.4
Promedio	153.6	132.5	114.1	58.06	16.8	9.91	7.61	15	34.73	56.6	80.97	124.4
3er cuartil	188.1	150.9	150.6	81	24	12.2	8	17.1	53.45	71.6	106.5	163.3
Rango intercuartil	81.6	70.9	72.55	53.2	16.2	9.2	5	13.4	38.65	31.5	59	79.65
Máximo	400.3	426.2	230.4	149.4	52.5	51.2	44.1	120	100.6	122.9	204.8	270.8
N° de datos	52	52	52	52	52	53	53	51	51	53	53	52
Medcouple	-0.04	0.13	0	0.17	0.16	0.47	1	0.58	0.49	0.36	0.17	0.25
Límite inferior	-38.9	13.23	-32.6	-16.2	-5.99	0.34	2.77	1.03	4.33	26.51	-1.83	34.54
Límite superior	293.4	331.9	257.9	238.5	70.6	103	417	223	463.4	267.9	279.1	493.3
N° datos atípicos	1	3	0	0	0	0	0	0	3	6	0	2

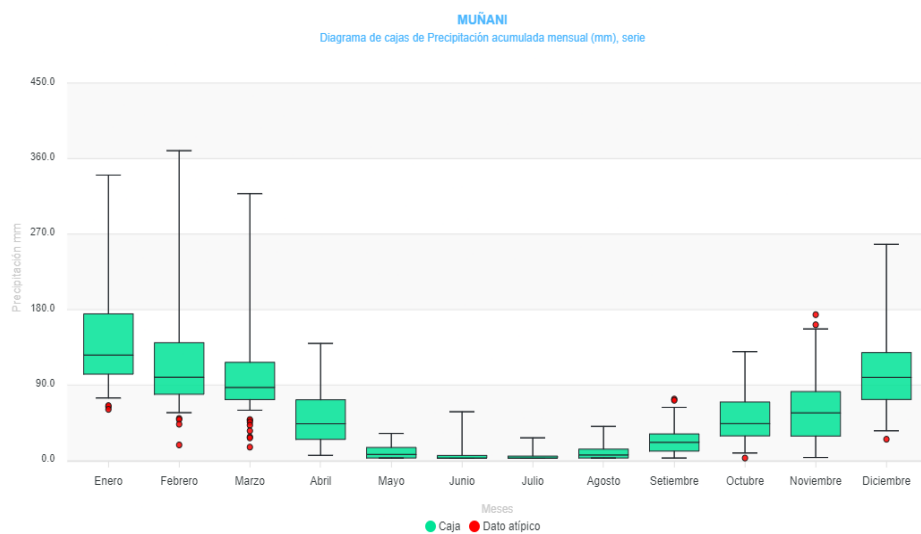
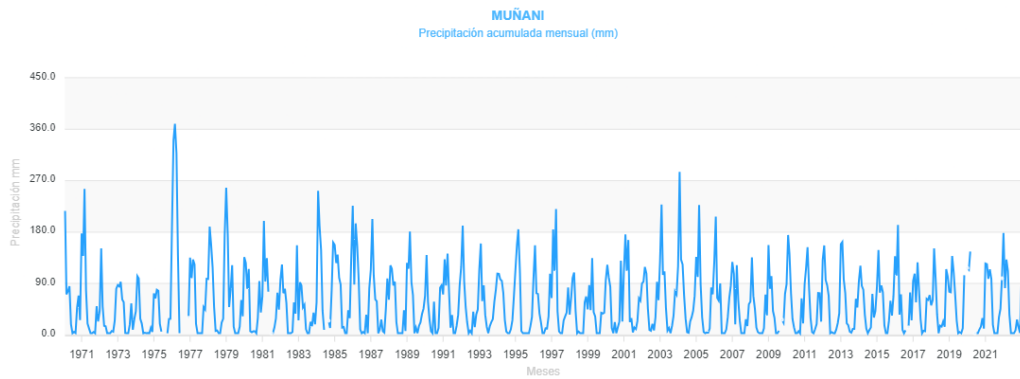


ESTACION HUANCANÉ



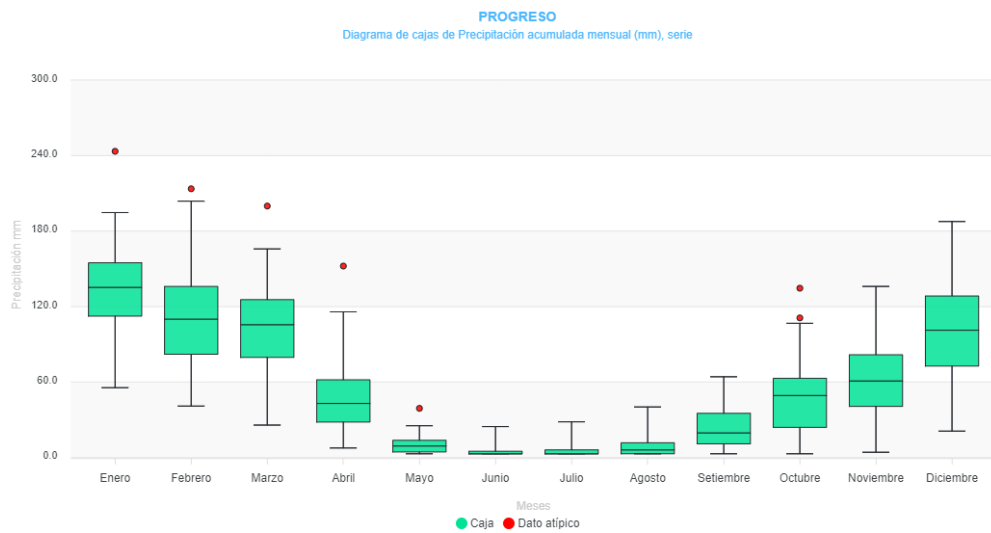
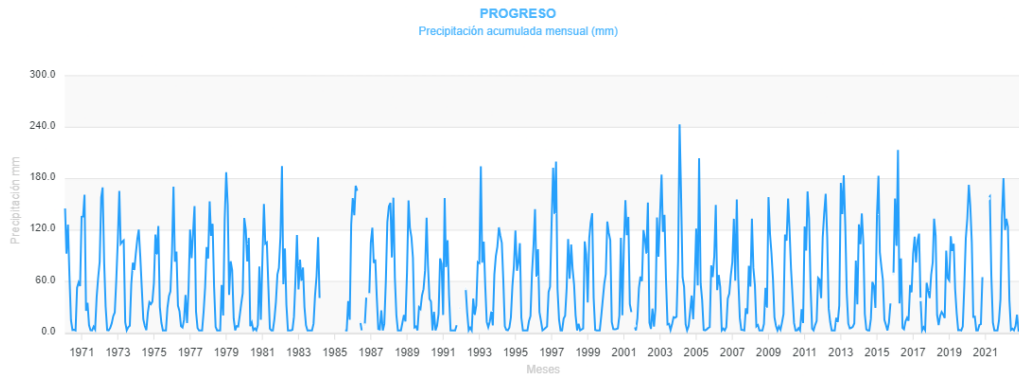
Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	34.6	23.1	12.7	3	3	3	3	3	3.6	10.6	3.7	19.6
1er cuartil	112.3	74.4	57.1	19	4.2	3	3	3.7	13.5	36.4	35.7	85.6
Mediana	135.7	114.7	107	42.3	12	4	4.1	6.8	24.75	51.4	54.3	108.9
Promedio	144.7	118.4	102.2	45.64	13.6	8.05	6.68	12.5	32.32	55.54	63	109.9
3er cuartil	178.2	151.4	134.3	61.1	18.5	10	9.2	17.4	45.8	70.6	81.5	135.8
Rango intercuartil	65.9	77	77.2	42.1	14.3	7	6.2	13.7	32.3	34.2	45.8	50.2
Máximo	329	240.2	272.8	168.8	51.6	54.1	26.5	75.1	106.8	143.1	206.4	215.2
N° de datos	50	50	49	49	49	49	49	49	46	49	49	49
Medcouple	0.22	0.02	-0.2	0.01	0.07	0.73	0.68	0.64	0.29	0.16	0.23	-0.03
Límite inferior	67.17	-31.8	-201	-42	-12.4	2.18	2.13	1.49	-4.12	7.2	4.66	1.04
Límite superior	420.4	278.5	191.8	126.8	47.3	205	148	280	199.7	168.3	251.8	203.8
N° datos atípicos	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1

ESTACION MUÑANI



Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	61	18.6	16	6.2	3	3	3	3	3	3	3.6	25.4
1er cuartil	103	79	72.7	25.25	3	3	3	3	11.25	29.4	29.2	72.8
Mediana	125.8	99.4	87.2	43.85	7.35	3	3	6.7	21.75	44.05	56.9	99.2
Promedio	141.2	115.9	97.66	50.67	10.5	6.76	5.3	9.95	24.55	50.37	60.74	107.1
3er cuartil	174.9	140.5	117.1	72.45	15.6	6.1	5.3	13.6	31.75	69.8	82.25	128.7
Rango intercuartil	71.9	61.5	44.4	47.2	12.6	3.1	2.3	10.6	20.5	40.4	53.05	55.9
Máximo	340.3	369.4	318.2	139.6	32.3	58.2	27.1	40.7	73.3	129.8	173.9	257.8
N° de datos	53	53	52	52	52	50	50	49	52	52	52	53
Medcouple	0.33	0.38	0.35	0.26	0.41	1	1	0.44	0.03	0.28	-0.01	0.22
Límite inferior	69.38	54.26	53.34	-3.75	-1.47	2.86	2.9	-0.47	-16.1	6.5	-53.6	33.57
Límite superior	583.5	555.6	390.4	268.8	114	260	194	104	66.98	254.1	159.1	328.4
N° datos atípicos	3	4	8	0	0	0	0	0	2	1	2	1

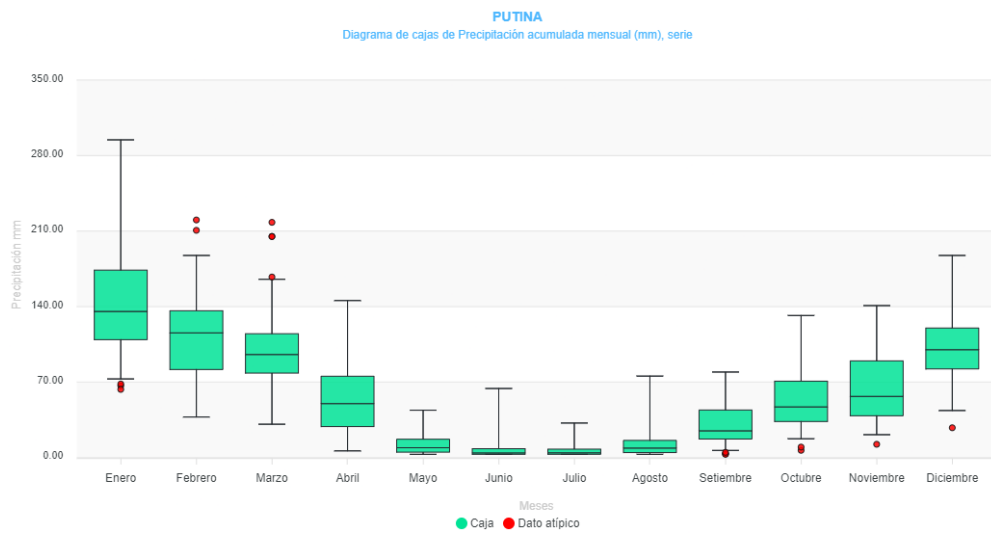
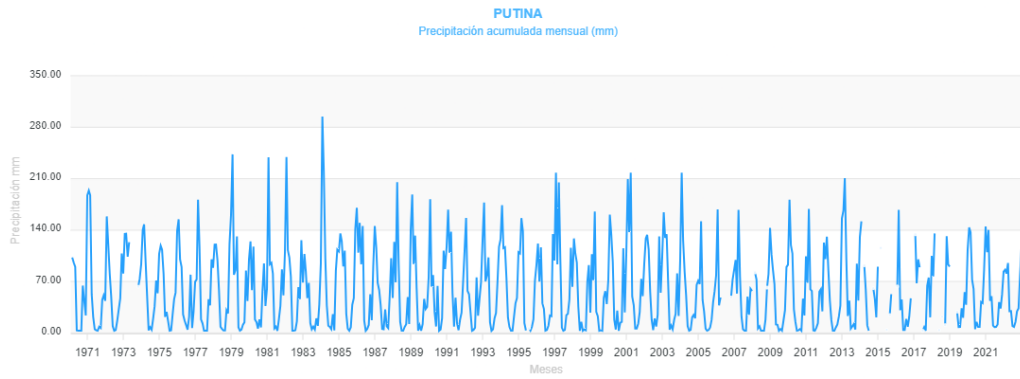
ESTACION PROGRESO



Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	55.5	40.9	25.8	7.6	3	3	3	3	3	3	4.2	21
1er cuartil	112.4	82.1	79.6	28.2	4.45	3	3	3	10.9	24	40.65	72.7
Mediana	135.3	110	105.6	43	9.2	3	3	6.1	19.6	49.3	60.9	101.2
Promedio	135.9	111.5	102.9	47.09	10.6	4.92	5.79	9.13	23.93	49.6	63.64	103.1
3er cuartil	154.8	136	125.5	61.8	13.7	5	6.1	11.8	35.15	63	81.7	128.4
Rango intercuartil	42.4	53.9	45.9	33.6	9.25	2	3.1	8.75	24.25	39	41.05	55.7
Máximo	243.4	213.6	199.9	152.2	39.1	24.6	28.4	40.2	64.2	134.6	136	187.6
N° de datos	50	51	51	50	51	50	51	52	52	49	51	49
Medcouple	-0.03	-0.04	-0.12	0.06	0.1	1	1	0.46	0.29	-0.07	0.06	0.04
Límite inferior	42.11	-13.9	-29.9	-13.4	5.29	2.91	2.86	0.38	-2.33	-55	-9.61	1.07
Límite superior	213.1	205.6	171.4	124.6	34.5	169	260	94.4	150.7	108	159.4	228
N° datos atípicos	1	1	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0



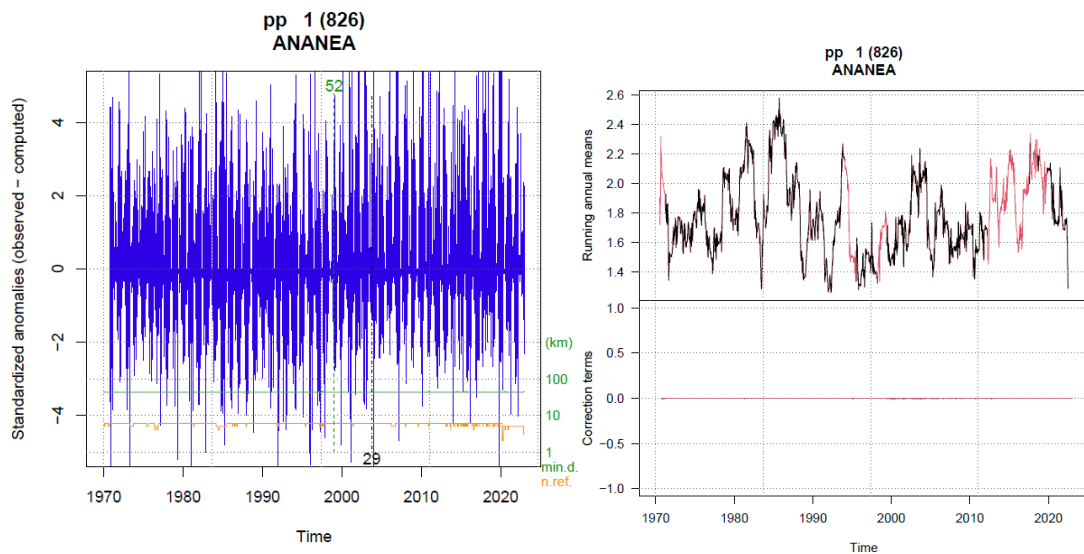
ESTACION PUTINA



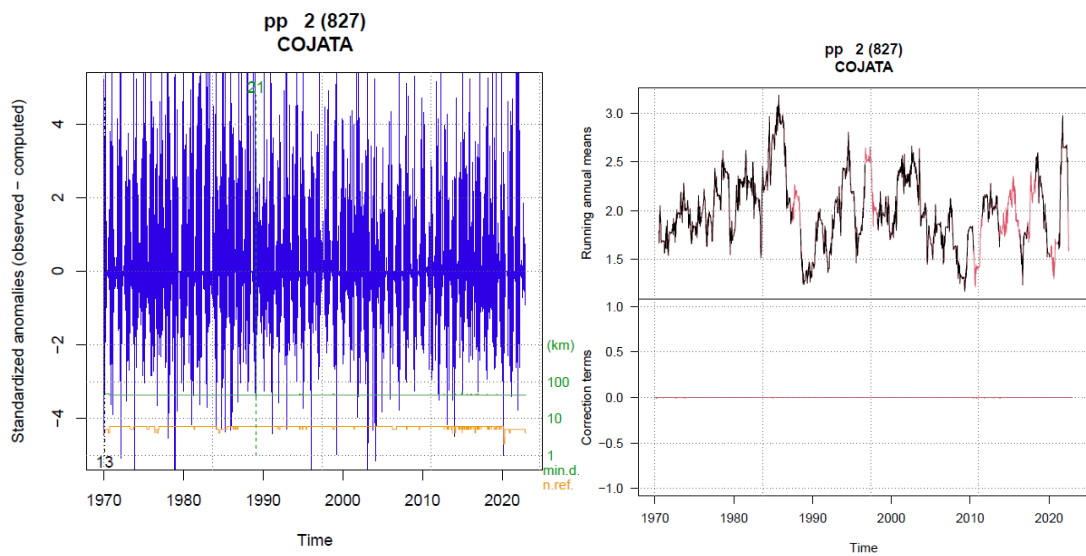
Estadísticos	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Mínimo	63.2	37.6	30.9	6.2	3	3	3	3	3	6.7	12.3	27.61
1er cuartil	109.3	81.64	78.31	28.7	5	3	3.01	4.6	17.16	33.41	38.74	82.17
Mediana	135.5	115.6	95.55	50.01	9.1	4.3	4.4	8.8	24.8	46.97	56.7	100
Promedio	146.1	114.3	99.23	54.91	12.8	8.25	6.7	12.2	30.02	54.17	65.68	102.6
3er cuartil	173.8	136.1	114.8	75.4	17	8.2	7.8	15.9	44.09	70.82	89.65	120.1
Rango intercuartil	64.5	54.49	36.51	46.7	12	5.2	4.79	11.3	26.94	37.41	50.92	37.93
Máximo	294.6	220.3	218.1	145.6	43.9	64	32	75.5	79.3	131.7	140.9	187.4
N° de datos	49	51	50	49	49	49	49	49	51	52	51	51
Medcouple	0.25	-0.09	-0.02	0.12	0.47	0.54	0.47	0.38	0.35	0.32	0.32	0.1
Límite inferior	68.97	-36	18.51	-18	1.57	1.84	1.62	0.04	5.41	15.1	13.9	42.78
Límite superior	436.8	195.6	165.5	186.8	137	76.9	54.7	91.9	209.9	272.7	365.4	206.7
N° datos atípicos	3	2	4	0	0	0	0	0	4	2	1	1

ANEXO 2. Graficas de anomalías y ajustes

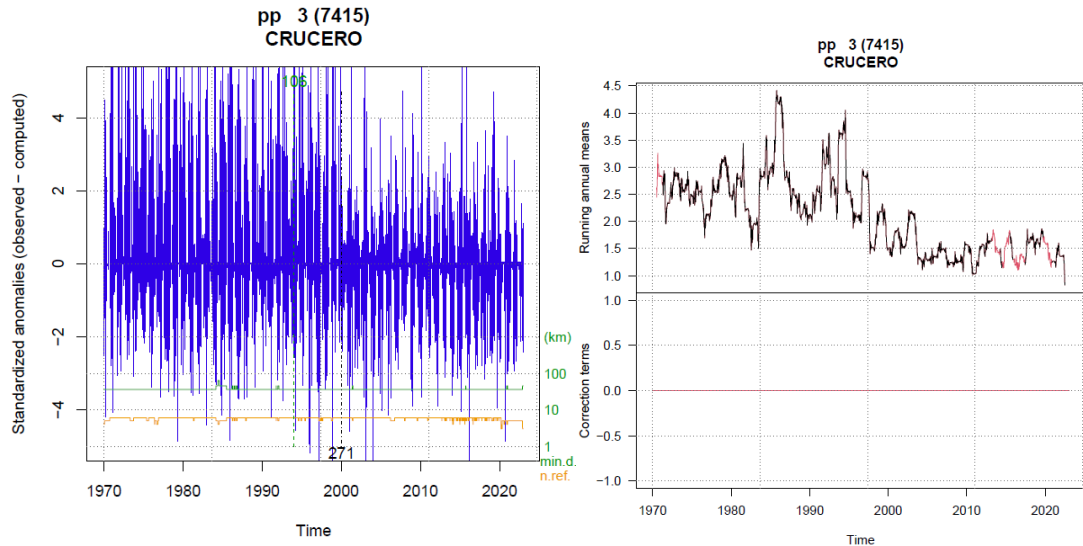
ESTACION ANANEA



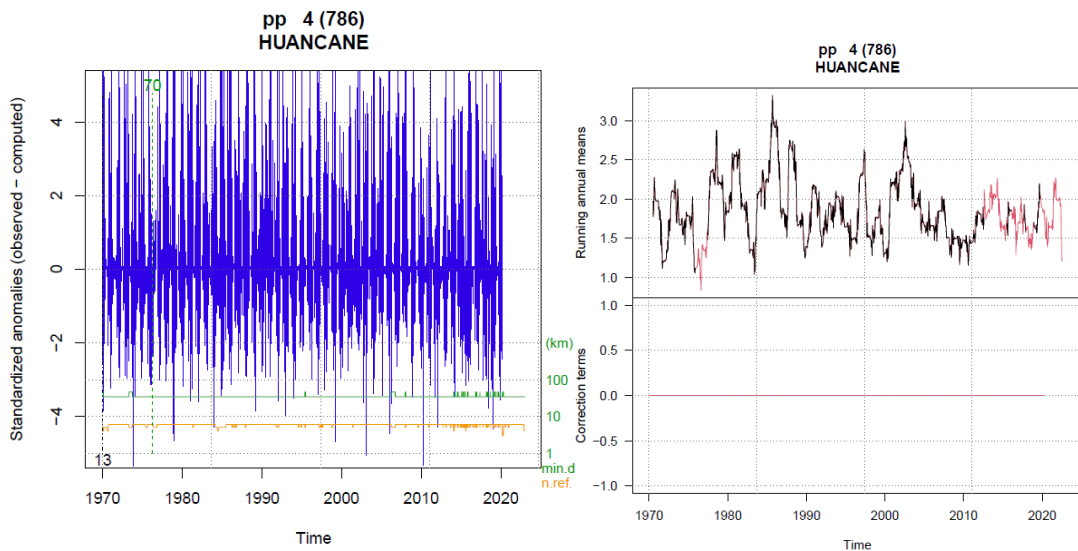
ESTACION COJATA



ESTACION CRUCERO



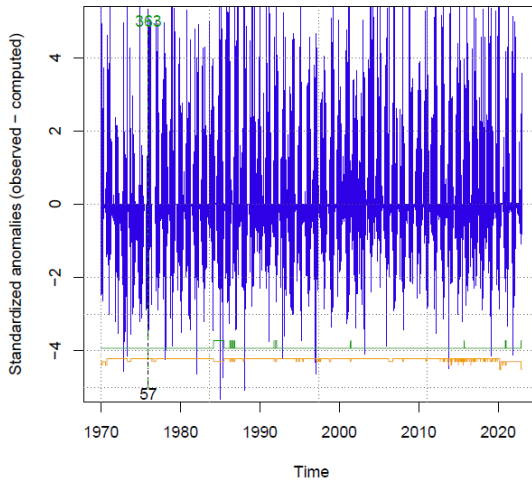
ESTACION HUANCANÉ



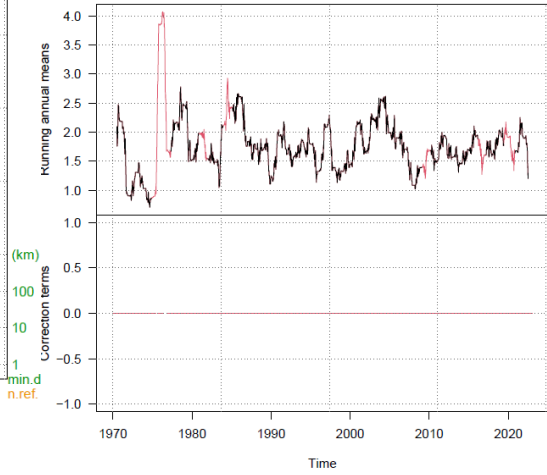
ESTACION MUÑANI



pp 5 (785)
MUNANI

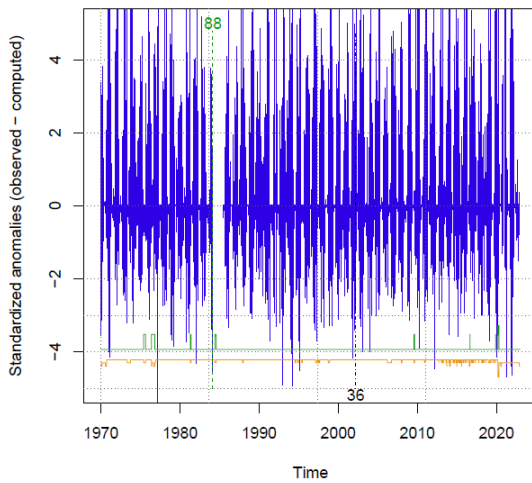


pp 5 (785)
MUNANI

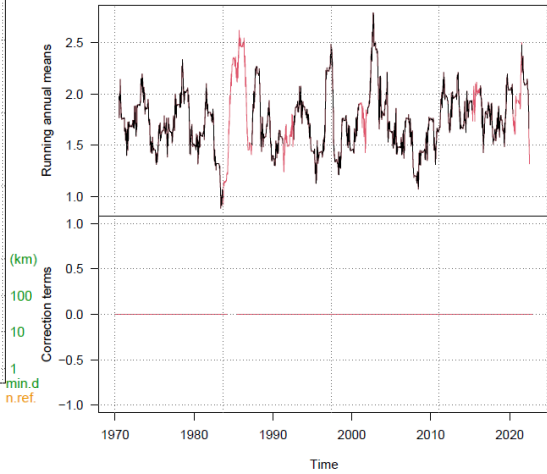


ESTACION PROGRESO

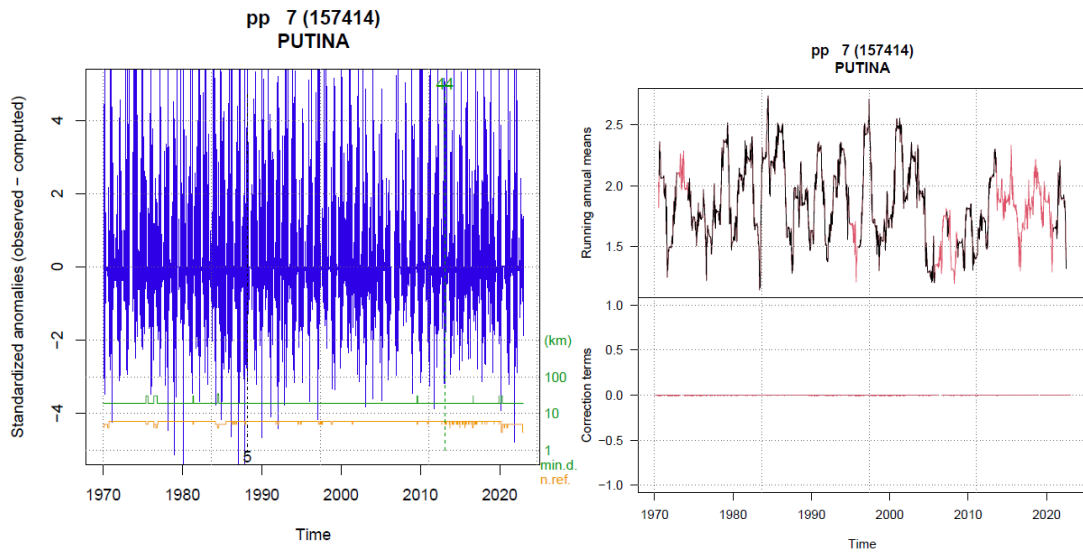
pp 6 (778)
PROGRESO



pp 6 (778)
PROGRESO



ESTACION PUTINA





ANEXO 3. Series completadas

ANANEA, Precipitación acumulada mensual mm, serie												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	133.2	78.9	88.7	71	16.2	9.1	10.6	10.1	50.9	76.5	19.3	127.1
1971	105.3	244.1	31.7	35.4	4.6	6	0	7.4	9.8	59.1	37.3	96.3
1972	112.3	100.6	85.5	31.7	7	1.5	6.7	43.8	30.1	43.6	56.2	109.4
1973	75	109.6	90.5	67.6	13.1	0.5	4.7	12.4	52.6	38.5	42.2	66.3
1974	111.1	110.8	78	48.3	9.9	11	21.3	33.8	24.7	28.6	28.4	110
1975	88.5	126	103.2	56.2	22.2	18.6	0	26.3	23.6	79.5	31.4	97.2
1976	122.8	98.8	90.3	28.2	52.6	13.4	16.1	6.7	59.2	6.5	19.9	80.6
1977	106.4	86.1	109.3	37.3	23.6	4.9	4.8	0	33.5	30.6	99.7	60.8
1978	87.3	87.6	113.5	53.5	9.1	6.3	0	0	51.8	19.5	98.6	145
1979	174.8	71.5	89.5	77.2	11.2	0	0	14.5	24.8	53.1	52.6	123.3
1980	129.6	94.5	100.5	21.5	26.5	0	1.7	10.4	36.7	60.8	42.6	81.7
1981	210.2	115.5	182	25.4	10.1	4.1	0	26	46.5	73.1	78.4	121.6
1982	190.3	75.9	114.9	92.7	2.8	5.5	0	15	40.2	55.6	82.9	83.6
1983	82.1	111.5	49	68.1	16.9	26.4	0	0	14.8	22.3	19.5	76.7
1984	158.4	161.3	138.8	29	0	0	10.8	43.1	7	59.8	123.7	121.1
1985	145.8	113.8	109	97.7	12.1	40.8	6.3	5.9	46.9	61.1	116.6	118
1986	131.7	128.6	152.2	67.1	18	0	5.1	16.2	62.8	40.1	59.3	127.5
1987	157.6	50.5	101.6	41.9	13.1	8.9	35.8	4.8	14.7	48.1	119.6	125.9
1988	112.8	93.9	115.4	76.8	24.2	0	0	0	5.6	22.9	30.4	81.8
1989	105.3	59.1	136	26.2	31.4	0	0	41.5	29.1	48.4	48	95.1
1990	167.4	82.5	22.9	46.7	8.3	49.7	3.2	24.5	8.1	76.3	70.7	119.5
1991	99.8	67.1	78.4	60.2	26	31.4	0	0	26.6	35.4	51.1	52.5
1992	74.8	90.1	83.6	42.9	0	14.1	0	30	8.3	34.9	69.8	83.8
1993	127	83.7	100.3	61.4	26.5	1.5	8.6	31.8	7.7	41.8	71.1	101.1
1994	150.2	188.4	114.4	76.5	0	3.9	0	9.9	7.3	23.7	39.2	101.1
1995	80.5	84.6	128.5	52	9.2	0	5.2	0	8.4	14.4	40.6	78.5
1996	132.2	98.6	56.2	28.6	19	0	0.5	31.4	17	27.9	62.5	23.3
1997	144.7	100	102.3	37.9	9.1	0	1.4	14.4	18.1	23.4	48.6	110.3
1998	76.4	102.1	76.6	35	0.5	6.2	0	0.5	8.9	68.4	79.7	49.2
1999	136.9	103.9	103.6	46.7	12.6	1.4	2.9	1.5	40.7	41.7	54.7	67.5
2000	93.2	97.8	95.4	23.7	7.1	18.1	4.1	12.7	20.4	75	26.1	112.5
2001	132.9	46.2	86.4	49.9	62.6	0.5	13.2	13.6	11.9	50.2	63.7	59.8
2002	65.9	125.7	107.9	42.3	10.1	0.5	27.2	19.7	39.5	48.8	115.3	74.4
2003	184.8	71.4	114	52.3	2.9	9.4	0	19.4	13.1	79.3	43.1	116.5
2004	236.3	126.8	79.4	39.8	11.7	21.4	6	11.4	31.2	45.8	60.2	83.8
2005	79.6	152.9	56	17.7	1.1	0.2	0	14	7.9	51.9	63	148.1
2006	165	83.1	61.3	62.6	2.8	5.4	0	20.8	29.2	71.3	69.2	98.1
2007	113.6	79.2	96.9	33.6	16.3	0	9.8	0	14.7	39.7	61	89.6
2008	168.2	62.7	60.3	40.6	24.7	2.8	1.8	7.7	7.1	48.3	56	133.7
2009	135.1	79.9	63.7	52.6	17.6	0	0	0	16.6	26.8	125.3	98.5
2010	115.4	95	103.2	22.6	14.4	0	6	0	2.4	38.4	40.4	90.9
2011	98.1	109.6	142.3	28.5	0	10.1	1.7	4.8	67.9	59.2	14.4	101.1
2012	76.3	106.8	84.5	86.1	4.8	9	6.8	0.2	18.9	24	69.6	167.7



2013	170.1	143.7	69.6	12	4.7	3.8	7.1	16.5	11.2	77.9	71.9	81
2014	144.3	102.5	114.6	37.4	16.3	2.4	23.5	8.1	52.8	42.8	60.6	94.7
2015	161	87.8	111.6	88	44.7	7.2	33.6	34.5	24.3	38.9	62.4	75.1
2016	131.1	115.5	36.8	56.9	5.2	0	13.1	13.8	34.3	74.1	48.9	83.9
2017	120.3	98	114.4	87	24.5	2	3.7	9.8	62.5	54.2	56.7	113.6
2018	104.8	179.2	124.3	23.3	5.4	42.9	10	30.1	29.6	88.9	76.3	58.5
2019	167.9	133.5	107.5	40.7	29.4	2	2.4	7	0.6	50.6	65.5	150.3
2020	93.3	167.4	145	52.5	20.8	9.7	0	6.7	18.4	30.7	14.6	125.1
2021	136.1	126.9	92.4	67.2	12.7	2.2	1.5	5.3	23.4	29	100.9	127.1
2022	133.6	82.9	92	16.2	3.7	0	1.5	25	22.3	31.1	14.5	48.5
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	236.3	244.1	182	97.7	62.6	49.7	35.8	43.8	67.9	88.9	125.3	167.7
Mínimo	65.9	46.2	22.9	12	0	0	0	0	0.6	6.5	14.4	23.3
Promedio	127.5	105.55	96.34	48.57	14.7	7.83	6.01	14.02	25.97	47.03	59.89	97.52
Desv. Est.	37.3	35.95	30.53	21.5	12.91	11.52	8.51	12.43	17.67	19.63	28.85	29.19
Mediana	129.6	98.8	100.3	46.7	12.1	3.8	2.9	11.4	23.4	45.8	59.3	97.2
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53

COJATA, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	101	94	106.6	75.2	5	0	2.6	3.7	52.9	32	25.3	147.4
1971	161.4	115.4	62.1	7.5	5	1.5	0	6.2	8.6	71.8	72.9	75.6
1972	183.7	87.8	82.8	55.7	0	0	3.7	18.6	16.7	54.5	80.7	80.7
1973	162.9	90.3	120.4	72.9	16.3	4.2	1.2	1.1	83.9	58.5	54.9	97.6
1974	168	146.1	64.4	48.5	4.4	6	0	35.3	13	63.9	35.5	103.2
1975	115.1	132.3	131.7	12	22.5	6.8	0	2	38.2	49.8	60	123.3
1976	163.1	86.2	107.1	45.1	21.5	27	9.5	28.5	84.9	12.9	13.3	69.9
1977	90.7	178.3	114.3	62.6	31.6	16.6	0	0	27.5	51.7	85.1	121.9
1978	175.3	156.7	83.3	68.3	0	16.7	0	0	26	0	147	236.6
1979	192.9	90.8	106.4	72.5	0	0	0	3.5	0	18.9	70.3	76.8
1980	211.1	86.1	135.7	16.3	15.7	1.4	12.3	16.3	52.7	102.4	40	66.5
1981	198.5	181.9	62.4	97.3	4.3	4.2	0	22.5	69	98.9	36.1	138.7
1982	197.2	46	145.5	72.7	8.3	0	0	13.5	68.5	72.1	139.3	72
1983	97.5	123.2	87	89.7	12.3	0	0	7	29.5	60	14.7	55.3
1984	294.9	227	62.8	57.2	0	16	13.7	47.5	10.8	51.3	121.7	127.8
1985	187.7	148.9	127.6	131.7	23.5	21	0	6.6	91.1	53.7	151.3	174.7
1986	144.2	161.1	147.8	104	18.7	0	7.3	26.2	80.5	32.8	64.5	123.1
1987	183.9	53.3	73.9	90.9	20.2	2.6	19	11.2	8.6	66.3	84.6	84.4
1988	186.4	106.8	119.8	64.4	38.5	0	0	0	0	63.3	0	82.8
1989	92.8	63.5	100.8	49.7	5.9	7.1	3.1	34.9	2.3	17.2	48.6	72.6
1990	130.4	40.6	66.7	52.2	5.5	63.2	0	13.1	16.9	74.3	95.5	73.6
1991	120.2	96.8	108.1	36.6	19.6	40.3	0	0	18.5	31.3	53.5	76.8



1992	171.7	78.5	60.5	7	0	15.1	0	64.6	27.6	29.1	73.1	165.3
1993	172.8	64.2	64.3	71.4	20.5	6.5	5.9	22	27.2	75.6	66.7	113.6
1994	111.3	169.9	132.8	123	31.8	7.9	0	0	56.1	67.1	114.9	122.3
1995	153.1	96	142.7	33.5	8.5	0	6.9	0	20.7	34	53.3	97.9
1996	127.2	87	111.2	70.6	32.5	0	5.3	27.7	29.8	52.2	88.3	130.5
1997	160.7	163.4	183.7	67.4	11.5	0	7.9	20	41	57.1	79.5	55.9
1998	82.6	184.5	119.1	81.2	0	12	0	8.1	5	70.9	111	41.4
1999	125.7	122.7	160.8	47.6	13.2	4.9	3.4	0	60.7	63.7	44.1	88.9
2000	144.7	115.9	64.8	26.5	10.7	19.6	5.4	40.3	28.5	115.6	22.9	124.7
2001	164.6	58.5	232.7	29.8	37.6	6.8	19.2	32.7	42.2	82.1	102.6	74
2002	83.2	189.5	130.3	57.6	26.2	0.8	37.9	19.9	43.5	111.9	87.4	92.5
2003	201.1	135.6	130.4	55.1	13.6	6.8	0	29.5	17.1	43.9	84.6	151.3
2004	240.4	85.6	35.8	55.2	19	19.1	6.4	22.3	47.2	29.1	73	35
2005	148.1	131.3	81.8	30.3	0.8	0	2.4	1.8	18.2	107.5	83.3	64.3
2006	231.4	38.5	80.8	47.7	3.8	0	0	7.2	19.8	43.6	59.7	84.7
2007	144.1	53.3	142.5	76.9	37.1	0	0	2.9	66.6	30.1	99.1	112
2008	130.1	42.9	79.2	20	3.5	8.5	0	3.5	16.3	79.7	26.7	117.1
2009	99.4	61.5	55.9	12.1	2.6	0	5.2	0	12	51.2	66.3	141.2
2010	135.7	152.8	74.7	12.5	14.9	1.5	2.7	2.2	0.8	35.5	6.2	111.2
2011	57.9	136.1	116.5	35.8	9.3	0.5	7.9	9.7	61.7	102.4	48.4	114.8
2012	104.5	150.4	101.6	78	1.2	2.1	13.3	5.8	35.2	59.6	37.5	158.4
2013	157.3	124.3	102.3	16.5	26.8	5.4	8.4	16.2	35.3	89	40.2	102.5
2014	117.8	82.1	86.3	64.3	3.7	1.2	26.6	20.5	71.8	41.5	47.3	111.2
2015	141.5	104.6	56.7	125	35.6	0	22.8	41.5	30	71	99.2	108
2016	89.2	143.8	14.4	61.8	12.2	1.2	8.5	15.7	18.7	62.1	61.1	67.6
2017	82	75	138	88.2	24.9	1.3	4.3	3.2	56.6	45.3	29.7	97.1
2018	141.3	172.2	186.2	13	7.2	39.3	15.9	40.2	10.2	148.5	48.8	98.2
2019	148.2	125.8	88	85.7	10.9	1.2	12.2	1	3.8	58.5	62.1	123.2
2020	92.2	125.3	34.4	47.7	8.2	0	0	6.3	36.3	62.6	3.9	99.2
2021	111.4	82.6	100.4	103	4.9	0	0	1.7	21.8	67.6	199.3	194.9
2022	152.4	165.9	137.4	22.9	0.7	1.8	0.6	4.3	22.5	21.7	3.1	66.4
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	294.9	227	232.7	131.7	38.5	63.2	37.9	64.6	91.1	148.5	199.3	236.6
Mínimo	57.9	38.5	14.4	7	0	0	0	0	0	0	0	35
Promedio	146.84	113.83	103.08	57.55	13.44	7.51	5.69	14.5	33.67	59.38	66.38	104.65
Desv. Est.	46.01	45.1	41.09	31.28	11.47	12.24	7.95	15.02	24.55	28.64	40.57	38.46
Mediana	144.7	115.4	102.3	57.2	10.9	1.8	2.7	8.1	27.6	58.5	62.1	99.2
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53



CRUCERO, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	76.1	85	62.1	38.9	11.9	6	10	9.4	40.5	35.1	34.7	116.2
1971	114.6	140.3	31.3	22.8	6.2	10.1	6.2	7.9	8.4	19.8	80.8	88.4
1972	89.6	44.8	45	56.9	17.7	8.6	6.2	20.9	29.6	46.7	53.7	78.5
1973	120.7	68.9	52.6	64	11.6	6.4	17.1	8.1	27.2	48	29.5	77.4
1974	70.5	124.8	54.4	40.2	7.9	11.5	10.8	18.7	28.3	54.6	35.5	90.1
1975	70.8	60.4	49.9	59.3	12.4	7.4	6.9	11.3	43.9	38.4	41.1	91
1976	109.7	53.6	60	25.3	22.5	7.3	7.9	12	36.5	11.9	26.2	77.2
1977	57	71.6	61.5	47.2	16.9	10.5	9	6.2	27.2	20.4	80.6	65.7
1978	80.4	84.4	81.8	36.7	8.8	12.7	6.2	7.1	48	15.8	63	111.7
1979	98.6	79.7	91.5	54.6	21.4	6	6.2	21.1	30.1	26.6	49.6	95.4
1980	103.1	48.7	76.5	22.9	12.5	6	6.2	8	49.4	57.5	17.2	36.8
1981	96.1	107.6	110	46.9	7.3	8.1	6.2	8	38.1	43.8	55.1	84.4
1982	79.6	57.5	42.5	21.9	9	9.6	6.2	9.6	12.1	27.2	69.6	48.9
1983	19	78	55.8	59.7	13	8.7	6.2	7.1	20	20.9	24.5	49.5
1984	192.1	113	64.7	39.8	10.5	7.8	8.1	22.2	14	55.4	66.8	72.4
1985	114.1	55.4	74.1	63.5	19.6	22.5	6.2	17.6	32.3	29.2	76.7	131.6
1986	124.1	164.8	112.8	74.7	10.4	6	8.7	22	34.8	25.8	60.5	95.2
1987	122.3	60.8	83.6	17.9	16.4	9.6	25.5	6.2	13.7	40.7	75.5	58.5
1988	61.3	81.3	83.6	47.5	16.6	6	6.2	6.2	15.8	33	29.5	90
1989	87.1	45.7	75.4	19.2	12.3	18	6.2	18.2	28	34.9	43.6	57.7
1990	79.5	58.6	45.7	32.5	6.2	28.9	6.2	8	20.9	56.5	93.2	44.9
1991	65.3	43.6	89.2	34.2	29.4	20.4	6.2	6.5	40.2	26.7	47.2	92.4
1992	137.1	134.4	70.8	8.4	6.6	17.5	9.7	60.7	7.7	34.4	100.5	80.9
1993	89.6	43.9	49.1	45.7	13.3	10	6.2	23.3	18	23.8	54.9	81.8
1994	139.6	203.7	70	44.9	17.9	8.7	6.2	8.6	51.8	33.9	35.4	104
1995	89.8	51.6	78.1	24.3	19.6	7.2	6.2	12.2	17.4	26.2	44.5	51
1996	82.6	69.2	64.1	30.5	23.4	6	6.2	15.4	12.6	18.6	54.9	42.3
1997	102.6	161.1	99.1	26.1	13.7	6	6.2	12.8	12.9	26.2	50.5	21.1
1998	23.9	49.4	80.4	37.6	6.4	8.1	6.2	6.6	7.1	62.7	53.7	23.9
1999	72.3	62.1	86.6	38	21.1	6.4	6.5	6.2	32.3	27.3	36.2	61.7
2000	111.8	61.1	67.1	4.1	7.4	9.2	5	5.9	10.7	87.5	23.8	107.2
2001	170.3	65.1	135.3	27.1	17.6	0	16.1	11.3	21.3	23.7	50.2	89.3
2002	52.5	166.7	91.8	22.5	11.4	1	21.2	10	25.8	71	74.9	149.5
2003	161.8	87.3	114	59	10.1	14.3	0	13.2	15.1	65.1	54	80.1
2004	114.2	59.3	38	46.6	7.8	10.1	4.1	1.3	10.8	32.6	70.3	67.1
2005	88.1	114.5	54	19.4	4.7	0	3.4	8.3	5.8	45.8	44.5	91.2
2006	156.4	45.9	53.9	34	0.9	4.9	0	14.2	17.9	32.5	105.4	94.7
2007	127.2	40	83.2	19.4	6.9	0.5	1.7	0	14.8	59.1	40.9	55.8
2008	135.3	48.1	60.9	21.8	14.3	0	0	5.3	3.9	57.3	43.6	123.3



2009	81.7	73	37.9	24.6	8.8	0	4.1	0	51.2	10.6	67.4	57.3
2010	147.8	101.1	116.3	5.8	12.2	0	0.9	1.3	2.8	46.8	22.2	92.1
2011	54.1	61.2	73.7	15.7	4.8	2.6	0	4.8	59.2	49.5	28.2	79.4
2012	148.2	91.8	67.4	27.8	0	18.4	0.5	0.6	18.9	16.8	77.6	119.4
2013	122.8	141.5	41.8	23.1	20	14.8	0	17.4	19.1	75.4	56.8	103.1
2014	98.9	67.9	61	18.4	3.5	0.2	4.4	0	36.7	38.7	21.5	85.2
2015	97.7	67.2	76.3	115	20.2	0	21.2	41.1	20.6	68	48.3	75.4
2016	31.4	92.5	20.2	49.5	6.7	0.2	16.2	10.8	17.5	75.8	36	49
2017	72.4	58.8	95.4	59.3	14.8	0	2.7	0	25.1	38.5	34.4	77.5
2018	118.2	118.4	147.7	14.6	3.3	10.9	26.6	10.6	8	57.7	48.8	42.6
2019	88.8	120.5	113.2	48.4	36.8	8.6	6.4	0	0.1	44.9	99	99.6
2020	78.2	121.2	74.5	31.2	0	0	0	0	7.8	38.4	7.8	135.8
2021	72.5	55	65.8	69.8	8.4	0	0	0	0.9	11	84.1	146.3
2022	93.2	68.2	82.3	8.6	0	0	0	2.8	1.2	16.2	4.2	27.6
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	192.1	203.7	147.7	115	36.8	28.9	26.6	60.7	59.2	87.5	105.4	149.5
Mínimo	19	40	20.2	4.1	0	0	0	0	0.1	10.6	4.2	21.1
Promedio	97.97	83.59	73.09	36.75	12.13	7.62	7.03	10.7	22.53	39.34	51.48	80.55
Desviación estandar	35.81	38.01	25.87	20.56	7.44	6.49	6.22	10.51	14.71	18.59	23.51	29.89
Mediana	93.2	68.9	70.8	34	11.6	7.3	6.2	8.1	19.1	35.1	49.6	80.9
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53

HUANCANE, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	164.4	71.4	90.4	52.1	10.2	1	0	0	42.8	58.2	37	193
1971	116.8	213	49.3	8.5	1	1	0	2.5	1.2	31.2	46.4	46.5
1972	169.8	79	50	13.5	0	0	6.5	7.5	43	26.3	61.5	167
1973	151.6	63.2	163.5	71.5	9	0	0	8.5	74.8	36.4	12.9	56.5
1974	190.4	141.8	51	36	0	3	0	24.9	18	35.5	47.5	62.5
1975	127	209.5	103.5	18.4	6	0	0	0	10.6	61.5	26.2	155
1976	66	58	9.7	0	21.5	8.6	1.8	26.6	71.8	6.1	22.1	97.6
1977	31.6	150.6	94.6	0	2.8	0	1.9	3.2	55.6	42	96	91
1978	120.8	237.2	143.6	65.4	0.1	7.7	6.8	0.1	34	28.5	131.1	195.2
1979	191.8	99.5	43.1	70.5	1.6	0	2.8	9.2	4.2	78.2	56.5	107.9
1980	118.3	125.4	132.7	31.3	7.1	0.2	5.7	9.8	74.7	91.2	26.3	85.1
1981	326	104	114.6	83	14.7	0.1	0	21.8	33.6	106.2	45.8	106.6
1982	175.2	35.8	112.8	58	1.2	1.2	0	4.2	50.4	39.2	126.2	48.2
1983	102.4	48.4	24.4	37.2	13.8	1	0	2.7	44.7	43	35.8	94.3
1984	190.4	166.7	125.4	38.8	14.2	9.6	0	17.8	1.4	72.2	113.4	76.4
1985	168.8	66	107.6	165.8	17	17.4	0	3.4	103.8	28.8	203.4	163.8



1986	183.2	148.4	151.4	67.6	9.2	0	9	20.3	72.6	17.6	85	115.1
1987	191.1	20.1	77.5	28.2	23.2	10.2	18.2	14.4	5.4	72.4	78.5	57
1988	227.4	77.9	269.8	123.2	48.6	0	0	0	8.9	48.4	5.1	93.3
1989	156	120.3	111.8	58.8	1.9	7	1.1	14.7	15.2	21.9	67.3	83.6
1990	121.9	55.6	49.4	21.2	12.8	44.9	0	35.9	25.6	52.1	98.1	98.6
1991	123.4	137.7	138	9	20.1	51.1	1	0.7	36.4	14.1	46.1	148.2
1992	132	75.4	46.9	6.4	0	9.7	9	72.1	13.7	66.6	45	140
1993	127.3	47.9	111.2	58.1	11.5	2.1	0	10.6	19.1	56.5	90.6	143.9
1994	100.8	114.7	150.6	39.5	14	1.8	0	0	11.8	39.2	64.6	132.8
1995	133.3	124.1	79.7	13.7	1.2	0	0.8	1.2	17	14.7	69.5	67.2
1996	200.9	80.8	71.1	17.5	2.3	0	7.6	3.5	13.1	9.8	70	177.4
1997	171.8	110.8	183.4	83.4	15.5	0	0	15.8	40.6	41.1	85	51.7
1998	109.3	69.4	87.5	52.9	0	5.7	0	0.5	4.2	65.2	162	16.6
1999	89.4	67.4	149.5	76.9	9.2	0.5	2.1	1.7	45.7	61.7	46.2	41.2
2000	85.2	55.9	113.8	7.1	12.1	7.3	0.5	21.4	10.5	97.8	14.7	113.5
2001	205.1	142.2	159.7	13.8	21.7	3.5	6.2	10.9	9.1	92	63.3	123.6
2002	90.9	175.5	151.5	102.3	21.1	4.8	23.5	6.1	37.3	140.1	85.8	116.8
2003	216.5	107.8	131.3	46.3	3	11	1.1	3	22.4	67.6	40.8	105.9
2004	195.9	147.1	54.1	42.8	6.1	11.8	8.3	32.8	21.1	34	51.3	91.9
2005	109.4	148.6	96.6	16.6	0.5	0	0	5.2	28	75.5	31.5	94.2
2006	224.3	31.1	76.7	39.3	0.5	1.5	0	3.8	23.1	55.9	51.3	113.2
2007	137.9	97.4	122.8	64	5.2	0	2.2	0.7	83.1	7.6	58.1	115.4
2008	134.3	76.6	61.8	5.1	8.7	0	0	0	5.5	48.5	32.7	212.2
2009	80.1	113.3	42.9	9.3	0.5	0	3.2	0	12.6	13.1	58.8	100
2010	156.2	112.5	38.8	21.2	24.6	0	0	0	0.6	47.3	0.7	118.8
2011	68.4	151.3	109.9	16	10.5	0	5.6	1.4	31.7	33.4	22.5	118.5
2012	143.2	130	140.4	40	0.2	0	0.3	1.6	11.5	21.4	26.2	136.9
2013	169.6	216.6	48.2	13.4	19.2	7.4	12.1	12.1	2.9	89.6	44.4	155.7
2014	139.7	174.7	63.7	32.5	15.7	0.8	14.1	12.5	63.2	45.6	8.4	117.7
2015	128.8	102	45	57.8	5.1	2	2.4	18.8	31.3	40.6	64	119.4
2016	96.4	236.5	14	53	0	0	5.5	8.2	12.4	65.3	83.1	82.6
2017	115.2	56.7	104	49.8	42.9	1.2	7.4	0	94	65.2	26.7	51.3
2018	84	103.4	130.7	10.3	2	20	13.8	2.6	3.4	93.8	18.7	60.3
2019	77	137.8	108.1	55.9	31.3	0.8	5.1	0	1.2	80.4	77.8	95.2
2020	114.8	191.7	93.3	41.4	4.8	2	0	6.3	23	48.1	6.7	120.7
2021	154.2	111.5	121.9	110.8	10.5	0.2	0	0.3	26.4	47.4	135.7	204.1
2022	135.2	156	123.3	33.7	0	1.1	0	10	26	21.1	3.1	68.4
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	326	237.2	269.8	165.8	48.6	51.1	23.5	72.1	103.8	140.1	203.4	212.2
Mínimo	31.6	20.1	9.7	0	0	0	0	0	0.6	6.1	0.7	16.6
Promedio	142.29	115.02	98.99	43.18	10.11	4.89	3.5	9.27	29.7	50.89	58.63	108.48



Desviación estandar	51.17	53.53	48.53	33.58	10.71	9.81	5.2	12.59	25.89	28.27	41.42	44.07
Mediana	134.3	111.5	104	39.3	8.7	1	1	4.2	23	47.4	51.3	106.6
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53

MUÑANI, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	171.3	60.1	65.6	71.2	21.3	9	11.3	9.6	42.7	59.1	26.5	141.9
1971	112.3	199.3	65.9	22	15.5	9	9.3	11	9	45.4	24.7	39
1972	122.4	44.6	19.4	18.2	9.3	9	9.3	12.3	11.1	26.3	67.9	73.5
1973	71.8	76.8	54.7	50.1	9.6	9	9.3	21.1	48.8	13.9	27.6	38.5
1974	85.6	81.8	28.6	22.3	9.3	9.6	9.3	9.7	9	16.8	10.8	62.1
1975	55.9	66.7	66.1	21.7	11.4	15.7	9.5	16	9	28.3	28.4	150.5
1976	264.6	285.8	248.1	112.5	9.3	14.4	13.9	18.2	51.1	14.5	29.7	109.3
1977	82.6	106	100.8	21.4	9.3	9	9.3	9.3	44	41	81.4	81.5
1978	150.5	126.9	97	43.9	12.4	12.7	9.3	9.3	23.2	28.4	138	202
1979	141.2	43.4	68.1	99	18	9	9.3	9.3	17.9	53.3	31.6	110.3
1980	102.4	67.8	94.9	11.8	10.7	11.6	12.1	9.3	29.6	78.3	36.6	57.9
1981	158.2	77.4	109	63.9	12.8	9	9.3	16.9	28.4	62.8	40.5	80.5
1982	100.7	61.7	68.6	49.2	9.3	9	9.3	10.9	50	35.5	125.9	26.4
1983	77.3	71.5	43.5	46.8	14.8	9	9.3	24.2	18.4	36.8	21	50.3
1984	197.9	151.3	119.7	38.9	13.9	12.2	12.7	26.2	16.2	66.1	129.4	126.4
1985	102.6	112.7	82.7	73.8	16.9	17.3	9.3	9.3	39.4	29.3	108.1	178.1
1986	73.8	153.7	125.1	80.4	14.4	9	11.1	9.3	33.7	9.3	68.5	94
1987	160.6	84.7	54.2	51.3	9.3	13.7	27.6	11.9	9.9	41.4	81.5	53.8
1988	99.3	94	73.3	77.3	23.9	9	9.3	9.3	9	39.8	11.9	102.5
1989	94.6	142.8	77.3	60.2	9.3	16.6	9.3	19.4	23.5	35	41.5	58.7
1990	113.1	50.5	27.6	11.5	9.3	50.9	9.3	9.3	16.1	69.9	72.6	60.7
1991	107.1	71.9	115.1	63.3	16.6	33.3	9.3	9.3	19	34	72	97.4
1992	152	77.8	44	23.5	9.3	12.3	9.3	37.9	17.2	34.5	40.6	94
1993	128.1	51.2	72.9	33.4	18	9	18.7	24	27.9	51.1	66.7	88.6
1994	88.4	80	79.3	62.8	26.9	11.4	9.3	9.3	14.4	26.7	58	92.8
1995	126.3	145.8	92.9	12	9.3	9	9.3	9.3	9	19.1	30.5	82.4
1996	125.7	62.2	61.5	35.4	23.4	9	9.3	15.9	15.2	32.1	87.9	56.3
1997	146.8	91.2	173.7	38.1	11.8	9	9.3	26.2	31.2	36.7	69.7	34



1998	56.9	81.6	90.1	38.7	9.3	11.3	9.3	9.3	9	50.5	57.8	41
1999	73.3	39.3	109	37.3	31.4	9	9.3	9.3	36.3	35.7	36.3	79.7
2000	100	83.2	71.3	16	9.3	23.7	9.3	17.4	24.5	105.2	24.5	91.7
2001	140.5	91.2	133	24	29.2	10.2	17.1	15.1	25.3	55.8	52.4	75.4
2002	77.9	96.5	88.9	41.1	13.6	12.4	21.9	13.1	30.2	77.6	53.2	104.9
2003	179.6	86.1	91.4	42.1	12.8	15.9	9.3	19.3	35.6	97.7	83.7	148.2
2004	383.1	167.7	149.7	83.6	31.2	0.9	0	22.9	27.5	43.9	78.6	168.9
2005	121.9	301.5	107.1	29.9	1.7	0	0	0	4.3	94.2	82.1	158.1
2006	272.3	69.6	65.7	119	0	0	0	4.6	39.2	80	102.6	159.8
2007	104	15.6	119.1	57.8	21.4	0	0	0	24.4	12.6	50.8	55.4
2008	132.8	65.4	42.7	10	1.9	0	0	0	8.9	67.7	31.4	154.5
2009	77.7	100.1	39.1	27.1	0	0	4.4	9.4	23.8	18.5	69	85.5
2010	171.9	138.5	69.5	25	10.2	0	0	3.7	0	61.1	17.1	86
2011	116.1	150.7	78.1	26.2	2	0	7.2	16.2	70.3	70.1	20.3	128.1
2012	153.6	93.1	83.7	65.4	0	1.8	0.2	0	6.5	18	35	155.8
2013	159.7	94.5	69.9	17.3	13.9	2.8	1	7.6	7.7	60.2	45	91.2
2014	118.3	82.9	76.2	32.7	8	0	5.5	10.2	68.8	27.6	38.8	81.2
2015	145.6	71	83.7	71.5	13.8	0	0	21.8	56.8	30.9	64.9	134.7
2016	100.9	189.7	32.4	67.9	6	0	5	2.5	10.2	71.2	22.5	91.4
2017	104.1	54.1	123.9	75.3	24.6	0	4.5	3.7	60.4	58.3	66.8	48.8
2018	58	148.3	95.7	32.6	0	13.2	11.6	20.6	11.4	112.2	99.5	72.5
2019	71.6	135.1	106.6	67.2	22	0	2.2	0	8.8	101.5	57.3	114.1
2020	111.2	142.9	119.2	37.5	0	0	0	6.6	11.6	26.3	8.2	122.1
2021	121	95.2	111.8	95.1	14.8	0	0	0	27.8	42.8	96.2	175.3
2022	78.8	128.8	109	32.7	0	0	0	5.2	24	10.4	0.6	83.6
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	383.1	301.5	248.1	119	31.4	50.9	27.6	37.9	70.3	112.2	138	202
Mínimo	55.9	15.6	19.4	10	0	0	0	0	0	9.3	0.6	26.4
Promedio	125.36	103.06	86.72	46.96	12.5	8.83	7.94	11.93	25.04	47.08	55.17	97.19
Desviación estandar	57.57	54.93	38.97	26.77	8.14	9.08	5.8	8.04	16.96	26.15	32.5	42.32
Mediana	113.1	86.1	82.7	38.9	11.4	9	9.3	9.4	23.5	41	52.4	91.2
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53



PROGRESO, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	142.2	89.4	123.5	63.4	11.9	0.5	0.8	0	49.7	56	51.7	132.6
1971	133	158.3	22.8	32.1	5.9	0.1	0	4.3	1.2	38.9	61.3	79.8
1972	155.2	166.7	79.3	27.5	0.4	0	2.8	8.3	16.6	21	57.9	104.2
1973	162.6	101	103.4	105	9.5	0	3.7	5.4	54.1	78.9	70.4	89.8
1974	107.1	117.5	86.4	49.8	13	5.1	0.2	21.1	32.9	30.7	33.5	55.1
1975	111.9	88.4	121.8	27.2	9	0	0	0	26.4	40	45.5	90.3
1976	167.6	80.1	92	28.8	22.3	4.8	3.3	12.5	41.2	8.6	48	117.7
1977	84.4	112	145	21.8	2.7	0	0	0	21.5	50.4	97.2	83.9
1978	150.6	110.3	124.3	50.8	4.1	0	0	0	52.9	17.3	128.9	184.6
1979	146.4	41.3	80.6	70.2	13.8	0	5	4.6	17.2	31.3	43.3	131.1
1980	117.2	80.4	108	4.9	9.1	0.3	2.3	0	6.1	74.6	12.3	81.3
1981	147.4	101.1	102.6	52	1.9	0	0	13.2	32.9	65.3	72.8	109.9
1982	191.7	53.9	95.5	29.8	0	0	0	0.8	15.8	60	111.3	47.8
1983	82.6	57.8	73.4	27.2	6	0	0	0	0	7.8	40.7	63.1
1984	108.7	37.9	122.5	37.7	4	3.1	4	27.4	6.8	73.3	126.6	125.7
1985	145.1	116.1	101.5	96.4	14.6	20.1	0	0	34.2	12.4	123.4	154.4
1986	134.3	168.7	162.8	103.8	10.6	0	2.8	6	38.2	18.8	41.4	102.3
1987	119.8	78.7	82.9	39.2	1.5	1	23.4	0	7.5	57.8	126.3	144.8
1988	148.8	85	154.8	61.4	17.6	0	0	0	9	17.9	10.5	67.5
1989	151.6	119.8	108.5	84.8	3.5	4.7	0	27	25	40.9	48.1	69.7
1990	131.5	75.6	36.7	33.5	0	21.6	0	5.4	19	84	77.6	18
1991	154.3	73.7	105.1	40.9	0	0	0	0	6	29.2	25.9	137.7
1992	159.7	121.4	49.1	21.1	0	3.2	0	37.2	18	29.4	79.8	78.6
1993	191.5	79.1	103.6	52.3	9.7	3.7	10.2	21.9	5.9	65	86.6	97.7
1994	120.1	110.7	102	59.2	4.8	0.5	0	3.2	15.1	51.8	74.8	116.6
1995	69.5	79.1	101.7	14.8	0	0	0	0	10.7	16.8	65.7	98.2
1996	141.5	62.8	94.6	21.4	10.8	0	1.4	3	4.6	44.8	50.9	125.4
1997	189.8	135.8	196.9	48	12.6	0	0	13.6	17	49	106.5	60.2
1998	100.2	72.2	52.8	17.5	0	7.7	0	1.2	2.2	103.7	88.7	32.6
1999	107.6	125.6	136.6	37.8	0.5	0	0	0	16.6	35.8	54.3	65.7
2000	126.9	114.1	105.1	9.6	1.4	1.2	1.6	2.4	17	108	17.6	99.6
2001	151.8	111	132.4	30.6	21.4	0.9	5.5	0	14.2	49.6	62.7	57.4
2002	117	107	89.6	149.2	8.8	1.8	25.4	4.4	25.6	131.6	86	134.6
2003	181.6	114.9	134.8	60.2	7	7.6	0.5	7	15.4	14.8	16.1	80.6
2004	268.5	160.2	61.8	50.6	7.4	0	4.8	22.8	40.6	13	53.8	118.8
2005	52.5	200.8	54.7	35.4	0.5	0	1.2	2.8	3.8	75.9	62.2	86.4



2006	146.4	46.9	64.6	50.5	0	2.1	0	3.9	37	42.9	63.6	79.5
2007	130.2	58.1	152.6	60.5	14.4	0.6	0.5	0	25.8	19.4	75.4	51
2008	130.3	73	52.4	4.6	6.2	0	0	0	7.6	49.6	26.5	155.6
2009	112.1	90.9	59.7	15.3	5.2	0	4.6	0.8	9.2	19.2	111.8	104.6
2010	153.8	118.8	98.6	40.8	8.6	0	0	2.6	0	24.8	8.6	121.2
2011	93.2	162.2	130.8	51.2	2.1	0	6.2	11	61.2	59.2	37.6	108.4
2012	137.6	159.4	109.2	25.2	9.6	0	0	0	14.6	9.6	29	172
2013	135.6	180.8	123.2	43.6	8	2.4	2.9	4.2	8.2	81.4	30.4	123.7
2014	100.6	136.4	102.3	19.2	1.2	0	0	13.6	56.6	51.6	26.2	134.5
2015	180.4	91	73.9	58.8	12.4	6.6	0	9.2	31.4	46	65.3	153.8
2016	98.6	210.6	31.4	84	2.8	1.2	10.6	14.8	11.2	53	44.4	89.6
2017	109.4	79.2	105	112.8	36.1	0	3.6	0.4	55.4	46.3	37.7	64.9
2018	79.2	130.2	110.3	18	6.2	16.8	21.5	18.6	14.4	92.9	61	58.2
2019	109.9	92.7	101	47.4	19.8	0.4	0.5	0	4.6	51.8	107.3	130.6
2020	169.8	145.6	102.6	15.8	16	0	0	6.4	7.2	62.2	5.9	137.6
2021	146.5	153.9	156.2	63.6	9.2	0	0	0	11.3	36.5	133	177.5
2022	117	130.2	120.8	35.2	0.6	2	0	5.1	18.4	0	1.2	61.4
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	268.5	210.6	196.9	149.2	36.1	21.6	25.4	37.2	61.2	131.6	133	184.6
Mínimo	52.5	37.9	22.8	4.6	0	0	0	0	0	0	1.2	18
Promedio	134.39	108.84	100.82	46.08	7.64	2.26	2.82	6.53	20.66	46.24	60.85	101.28
Desviación estandar	36.44	40.28	34.92	29.28	7.21	4.74	5.68	8.7	16.38	28.17	35.11	37.83
Mediana	134.3	110.3	102.6	40.8	6.2	0	0	3.2	16.6	46	57.9	99.6
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53

PUTINA, Precipitación acumulada mensual mm, serie

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1970	160.2	99.8	92.6	86.9	0.5	0	0	0	61.4	40.3	20.7	184.4
1971	190.8	184.4	49.5	19	2	0.7	0	5.6	3.8	42.1	48.1	40.6
1972	155.6	119	77.7	46.6	6	0	1	13.8	28.6	43.9	105.1	77.8
1973	131.9	132.2	100.7	120.5	7.9	0.1	2	11.2	60.2	59.9	70.4	90.7
1974	137.1	144.8	93.6	47.5	0.6	4.8	1.4	16.8	33.4	68.3	51	104.7
1975	115.6	110.3	77.5	18.8	25.5	13.5	0	0.5	21.4	42.8	51.8	135.6
1976	151.7	97.3	86.8	22.3	14	8	1.5	19.1	76.3	3.7	26.2	66.7



1977	69.9	178.2	111.8	15.4	10	0	0.1	0	42.8	34.5	97.1	85.6
1978	117.2	117.4	95.3	55.3	5.3	2.6	0.3	0.3	27.8	23.5	117.3	158.1
1979	240.1	76.3	82.4	128.5	4.6	0	1.5	8.2	11.4	82	40.4	97
1980	121.5	55.4	114.4	15.2	11.9	3	15.3	4.6	52.9	91.7	33.8	57.4
1981	236	90.5	92.5	77.8	3.3	5.7	0	15.9	33.9	83.4	48.3	107.2
1982	236.4	109.9	99.5	73.8	0	0	0.8	12.9	59.3	43	123.1	65.5
1983	104.6	81.1	44.4	65.1	10.4	2	5.6	1.6	16.8	6.7	36.2	92.2
1984	291.6	217.3	98.3	34.6	6.8	5.3	2.2	22.5	0.6	81.8	110.5	108.1
1985	132.5	121.7	87.7	109	23.2	2.8	0	4.7	35.3	44.3	137.9	167.4
1986	106.3	146.9	90.4	142.6	13.7	0	2.4	7.9	49.7	14.4	86.7	142.6
1987	112.8	65.4	55.3	34.9	2.5	2.1	29	6	3.6	47.5	98.6	44.5
1988	120.8	66	202.1	91.9	12	0	0	5.3	8.9	45.9	9.3	137.4
1989	185.3	90.8	129.5	58.5	0	7.5	0	9	43.3	29.6	32.4	72.9
1990	179	60.1	75.9	25.7	5.8	61	0	1.8	17.3	109	84	114.2
1991	164.8	106.1	134.9	51	5.7	45	9.8	0.8	14.9	24.8	64.7	108.7
1992	153.6	54.3	49.7	25.2	0	1.2	4	72.5	20.5	44.5	66.3	123.7
1993	174.4	67.1	75.3	99.8	11.4	0	2.1	17	24.2	67.3	114.2	124.2
1994	170.8	112.6	113.7	72.4	17.8	5.2	0	0	18.6	37.4	44.6	106.9
1995	105.2	153.3	135.3	10.5	0.5	0	3.4	0	5.2	15.5	67.6	89.4
1996	118.6	66.8	113.5	37.3	29.6	0	0.9	6.9	20.8	19.9	131.6	95.7
1997	215.2	90.5	201.9	96.8	4.2	0	1.1	21.4	22.9	42.4	112.8	59.9
1998	125.6	105.7	92.8	32.9	0	12	0	1.6	0.5	66.9	89.4	24.6
1999	104.1	68.9	162.3	25.6	19.8	0	0.7	0	45.1	53.8	36.4	68.9
2000	158	131.4	93.7	15.1	1.7	27.4	0	11	12.2	112.3	25	105.2
2001	206.3	134.2	215.1	46.5	34.8	3	3.1	9.8	25.8	70.6	47.1	91.4
2002	125.5	130.5	110.6	53.3	14.6	1	16.7	5.8	21.8	128.4	51.6	100.6
2003	161.1	126.4	131.3	67	1.4	7.2	2	14.9	23	78.1	20.1	95.6
2004	215	123.3	79.9	47.9	6.1	0	1.2	18.3	21.6	17	62.4	67.9
2005	63.5	148.9	41.7	26.4	2.9	0	1	4.3	14.7	39	53.7	75.5
2006	165.2	34.6	45.4	77.1	0	0	0	5.3	32.4	45.3	68.8	82.5
2007	96.4	50.6	164.4	74.4	19.2	2.1	0	0	46.3	21.8	57.1	54.1
2008	158.6	79.4	69.7	3.2	6	0	0	0	15.5	58.7	77.1	140
2009	103.4	83.1	63.5	8.6	8	0	2.4	0	13.6	27.8	86.6	89.9
2010	178.2	116.5	105.1	29.3	12.1	0	0.6	2.3	0	43.7	20.9	101.4
2011	65.2	165.7	56.2	54	0.4	0	4.1	10.2	53.3	56.6	26.4	120
2012	97.6	128	82.4	41.4	14.4	0	0	4.7	8.7	19.5	34.3	152.9
2013	163.6	207.7	98	20	40.9	2.9	5.9	9.1	1.8	91.2	41	127.5
2014	149	122.5	89.1	55.4	7.3	0	6.6	14.7	58	43.4	18.2	87.2



2015	178	112.6	76.3	75.1	11	1.3	5.3	21.3	49.7	80.1	71	141
2016	60.2	164.6	27.9	42.6	1	1	16	5.4	19.1	44	42.1	86.5
2017	131.3	64.6	97.2	86.3	24.8	0	4.8	0	61.3	72.3	18.3	101.9
2018	73.9	132.4	130	38.8	0.9	31.2	19.1	19.3	7.6	128.7	90.2	87.4
2019	118.1	141.1	67.2	76.9	7.7	0.8	1.4	0	7	67.5	70.7	89.3
2020	115.3	199.7	93.9	39.1	0	0	0	3.4	25.6	62.1	5.5	59.7
2021	145	75	107.8	107.8	11.2	0	0	2.7	34.4	34.5	65.9	169.4
2022	107.6	142	83.8	47.2	0	5.3	0.6	3.6	21.6	24.9	1.9	50.8
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Máximo	291.6	217.3	215.1	142.6	40.9	61	29	72.5	76.3	128.7	137.9	184.4
Mínimo	60.2	34.6	27.9	3.2	0	0	0	0	0	3.7	1.9	24.6
Promedio	144.63	113.3	97.5	54.24	9.08	5.01	3.32	8.57	27.1	52.42	60.61	98.68
Desviación estandar	48.84	42.04	39.17	33.02	9.46	11.47	5.8	11.25	19.19	29.29	34.55	34.73
Mediana	137.1	112.6	92.8	47.5	6.1	0.8	1.1	5.4	21.8	44.3	53.7	95.6
Sin datos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° registros	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53

ANEXO 4. Análisis de estacionariedad e independencia

ESTACION ANANEA

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	0.92	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	0.8	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	0.4	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	8	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.88	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	2.24	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	-0.19	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.27	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	1.54	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-2.12	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-2.35	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	2.38	2.58	1.96	1.65	S (0.05)

ESTACION COJATA

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	0.2	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	-0.33	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	-0.71	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	5	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.91	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	1.94	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	-0.03	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.65	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	1.26	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-0.78	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-1.77	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	2.1	2.58	1.96	1.65	S (0.05)



ESTACION CRUCERO

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	0.13	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	0.1	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	0.3	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	4	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.55	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	1.23	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	-0.21	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.06	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	1.26	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-0.45	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	0.14	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	0.26	2.58	1.96	1.65	NS

ESTACION HUANCANÉ

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	0.53	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	-0.45	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	-0.45	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	5	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.66	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	1.8	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	-0.7	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.64	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	0.14	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-0.78	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-0.81	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	1.51	2.58	1.96	1.65	NS



ESTACION MUÑANI

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	1.43	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	1.48	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	0.8	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	7	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.79	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	2.31	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	1.2	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.98	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	2.1	2.58	1.96	1.65	S (0.05)
	Turning points Test	-0.11	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-2.34	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	2.18	2.58	1.96	1.65	S (0.05)

ESTACION PROGRESO

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	1.08	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	1.02	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	0.9	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	9	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.77	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	2.35	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	0.61	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	0.91	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	1.54	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-1.45	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-0.64	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	0.42	2.58	1.96	1.65	NS



ESTACION PUTINA

Grupo	Prueba	Estadístico Z	a=0.01	a=0.05	a=0.1	Resultado
Tendencias	Mann-Kendall	0.97	2.58	1.96	1.65	NS
	Spearman's rho	-1.05	2.58	1.96	1.65	NS
	Linear regression	-1.09	2.63	1.99	1.66	NS
Cambio en media/mediana	Cusum	8	11.75	9.81	8.8	S (0.01)
	Cumulative deviation	0.98	1.52	1.27	1.14	NS
	Worsley likelihood	2.12	3.79	3.16	2.87	NS
Diferencia en media/mediana	Rank sum	-1.29	2.58	1.96	1.65	NS
	Student's t	1.2	2.67	2	1.67	NS
Aleatoriedad	Median crossing	0.14	2.58	1.96	1.65	NS
	Turning points Test	-1.45	2.58	1.96	1.65	NS
	Rank difference Test	-0.31	2.58	1.96	1.65	NS
	Auto correlation Test	0.1	2.58	1.96	1.65	NS



ANEXO 5. Curvas IDF e hietograma

ESTACION ANANEA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{89.55894 \cdot T^{0.1568485}}{0.618581 \cdot t}$$

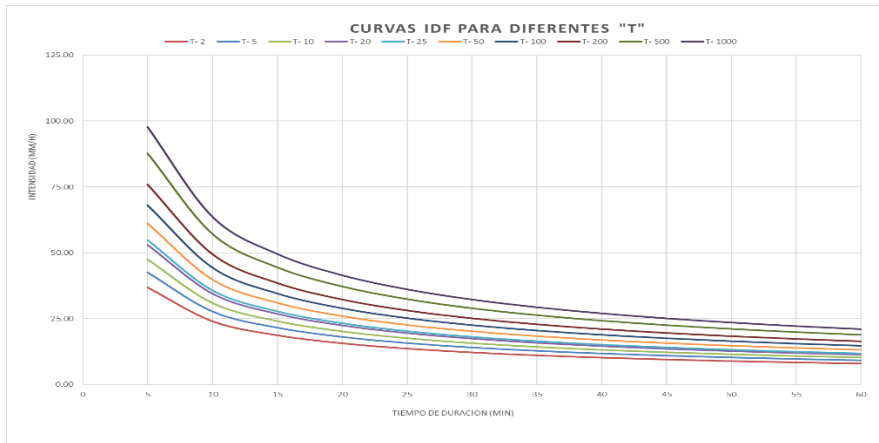
Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Período de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de precipitación (min)

años T	Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración											
	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T- 2	36.89	24.03	18.70	15.65	13.63	12.18	11.07	10.19	9.48	8.88	8.37	7.93
T- 5	42.60	27.74	21.59	18.07	15.74	14.06	12.78	11.77	10.94	10.25	9.66	9.16
T- 10	47.49	30.93	24.07	20.14	17.55	15.68	14.25	13.12	12.20	11.43	10.77	10.21
T- 20	52.94	34.48	26.83	22.46	19.56	17.48	15.89	14.63	13.60	12.74	12.01	11.38
T- 25	54.83	35.71	27.79	23.26	20.26	18.10	16.45	15.15	14.08	13.20	12.44	11.79
T- 50	61.13	39.81	30.98	25.93	22.59	20.18	18.34	16.89	15.70	14.71	13.87	13.14
T- 100	68.15	44.38	34.54	28.91	25.18	22.50	20.45	18.83	17.50	16.40	15.46	14.65
T- 200	75.97	49.48	38.50	32.23	28.07	25.08	22.80	20.99	19.52	18.28	17.24	16.33
T- 500	87.71	57.13	44.46	37.21	32.41	28.95	26.32	24.23	22.53	21.11	19.90	18.86
T- 1000	97.79	63.69	49.56	41.48	36.13	32.28	29.34	27.02	25.12	23.53	22.19	21.02



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.150	P24 hr (mm)	37.80	Intervalo de t (min)	10
---------------------	-----	--------------------------	----	---------	-----------------------------	-------	-------------	-------	----------------------	----

CURVA IDF PARA "T"

PATRON TORMENTA CURVA "S"

Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	22.495	11.248	11.248	22.495	0.825	1.257	0.825
60	14.851	14.851	3.404	6.807	0.862	1.325	1.288
90	11.401	17.102	2.450	4.901	0.706	1.418	1.993
120	9.543	19.095	1.983	3.987	0.758	1.515	2.751
150	8.212	20.791	1.635	3.331	0.821	1.641	3.572
180	7.428	22.277	1.497	2.893	0.900	1.789	4.471
210	6.750	23.626	1.349	2.638	1.002	2.004	5.473
240	6.215	24.861	1.234	2.469	1.142	2.285	6.636
270	5.778	26.003	1.142	2.295	1.349	2.638	7.985
300	5.414	27.069	1.066	2.132	1.635	3.331	9.660
330	5.104	28.071	1.002	2.004	2.450	4.901	12.111
360	4.838	29.018	0.947	1.895	11.248	22.495	23.359
390	4.603	29.918	0.900	1.799	3.404	6.807	28.762
420	4.397	30.776	0.858	1.715	1.983	3.967	28.745
450	4.213	31.597	0.821	1.641	1.497	2.993	30.242
480	4.048	32.384	0.787	1.575	1.234	2.469	31.476
510	3.899	33.142	0.759	1.515	1.066	2.132	32.542
540	3.764	33.872	0.730	1.461	0.947	1.895	33.450
570	3.640	34.578	0.706	1.412	0.858	1.715	34.247
600	3.526	35.261	0.683	1.366	0.787	1.575	35.135
630	3.421	35.923	0.662	1.325	0.730	1.461	35.985
660	3.324	36.566	0.643	1.286	0.683	1.366	36.849
690	3.234	37.192	0.625	1.251	0.643	1.286	37.192
720	3.150	37.800	0.609	1.217	0.609	1.217	37.800

Tormenta de diseño para T años



ESTACION COJATA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

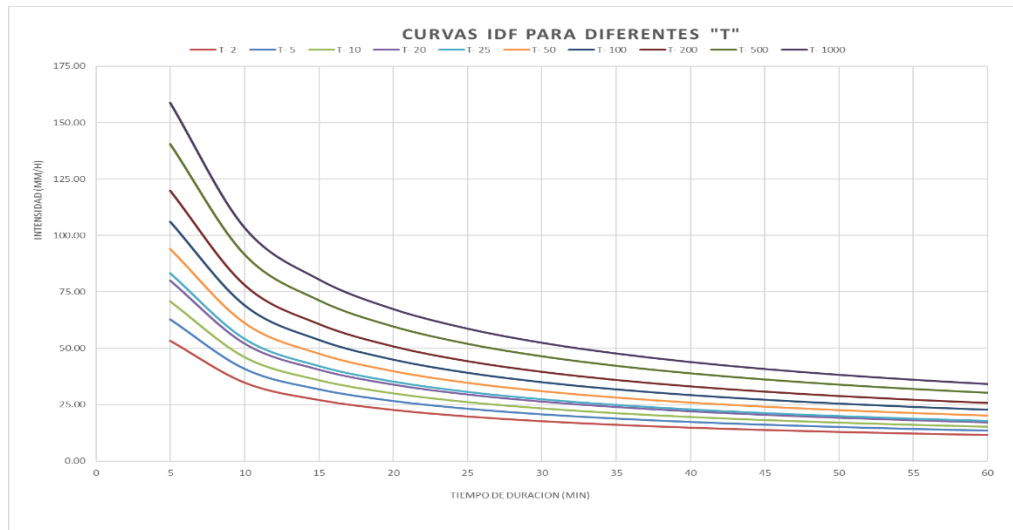
$$I = \frac{127.98052 \cdot T^{0.1753554}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

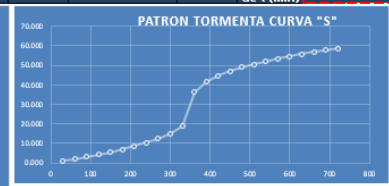
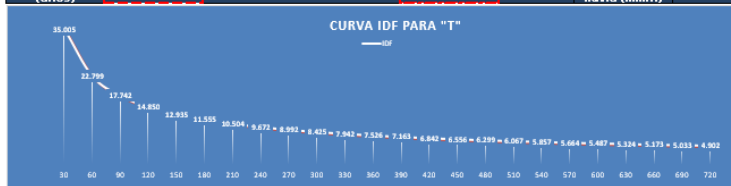
I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

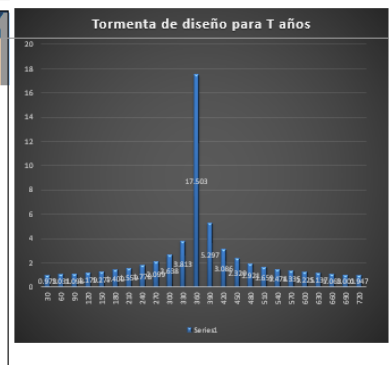
años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	53.40	34.78	27.07	22.65	19.73	17.63	16.03	14.75	13.72	12.85	12.12	11.48
T-5	62.71	40.84	31.78	26.60	23.17	20.70	18.82	17.33	16.11	15.09	14.23	13.48
T-10	70.82	46.12	35.89	30.04	26.17	23.38	21.25	19.57	18.19	17.04	16.07	15.23
T-20	79.97	52.08	40.53	33.92	29.55	26.40	24.00	22.09	20.54	19.25	18.14	17.19
T-25	83.16	54.16	42.15	35.28	30.73	27.45	24.95	22.98	21.36	20.01	18.87	17.88
T-50	93.91	61.16	47.59	39.84	34.70	31.00	28.18	25.95	24.12	22.60	21.31	20.19
T-100	106.04	69.07	53.75	44.98	39.18	35.01	31.82	29.30	27.24	25.52	24.06	22.80
T-200	119.75	77.99	60.69	50.80	44.25	39.53	35.93	33.09	30.76	28.82	27.17	25.75
T-500	140.62	91.59	71.27	59.65	51.96	46.42	42.20	38.85	36.12	33.84	31.91	30.23
T-1000	158.80	103.43	80.48	67.36	58.68	52.42	47.65	43.87	40.79	38.22	36.03	34.14



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	4.902	P24 hr (mm)	58.82	Intervalo de t (min)	30
---------------------	-----	--------------------------	----	---------	-----------------------------	-------	-------------	-------	----------------------	----



Instante (min)	intensidad (mm/h)	P.acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	35.005	17.503	17.503	35.005	0.973	1.946	0.973
60	22.799	22.799	5.297	10.689	1.031	2.061	2.004
90	17.742	26.613	3.813	7.626	1.058	2.197	3.102
120	14.950	29.839	3.226	6.175	1.179	2.283	4.261
150	12.935	32.337	2.638	5.277	1.277	2.554	5.558
180	11.555	34.666	2.329	4.658	1.400	2.800	6.958
210	10.504	36.766	2.099	4.199	1.559	3.119	8.517
240	9.672	38.687	1.921	3.842	1.778	3.595	10.295
270	8.992	40.464	1.778	3.595	2.039	4.139	12.384
300	8.425	42.123	1.659	3.319	2.338	4.777	15.033
330	7.942	43.683	1.559	3.119	2.664	5.544	18.846
360	7.526	45.157	1.474	2.948	3.005	6.448	23.349
390	7.163	46.557	1.400	2.800	3.364	7.488	28.541
420	6.842	47.892	1.335	2.670	3.739	8.667	34.341
450	6.556	49.169	1.277	2.554	4.129	9.986	40.667
480	6.299	50.394	1.225	2.451	4.534	11.441	47.511
510	6.067	51.573	1.179	2.358	4.954	13.039	54.841
540	5.857	52.710	1.137	2.273	5.399	14.774	62.674
570	5.664	53.808	1.098	2.197	5.869	16.648	71.011
600	5.487	54.871	1.063	2.126	6.364	18.667	79.841
630	5.324	55.902	1.031	2.061	6.884	20.834	89.141
660	5.173	56.902	1.001	2.001	7.439	23.167	98.941
690	5.033	57.875	0.973	1.946	8.019	25.674	109.241
720	4.902	58.823	0.947	1.894	8.624	28.348	120.041





ESTACION HUANCANÉ

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

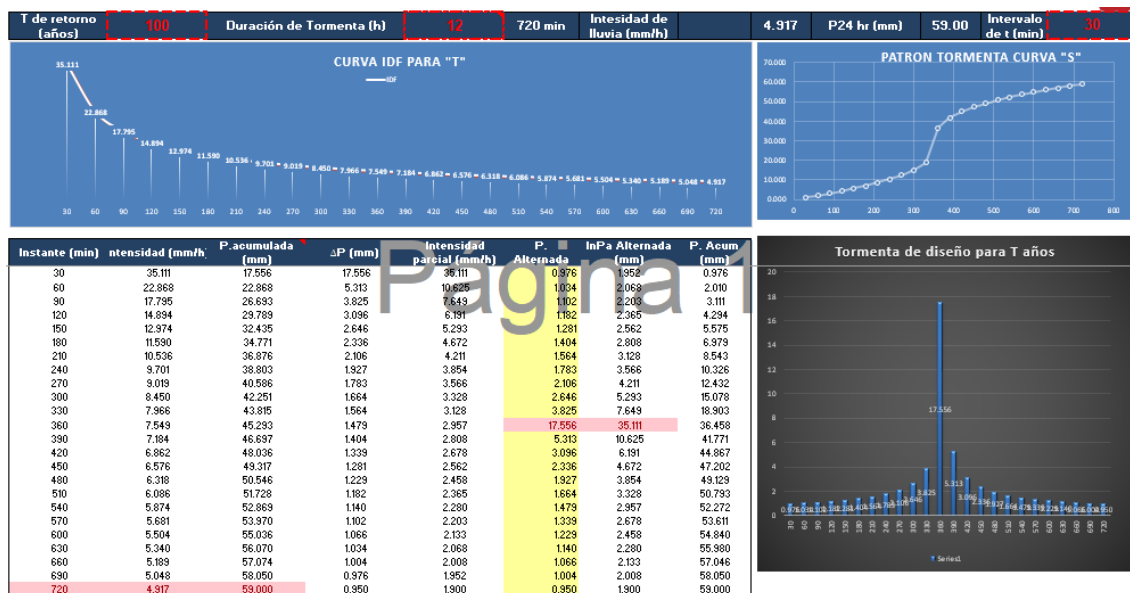
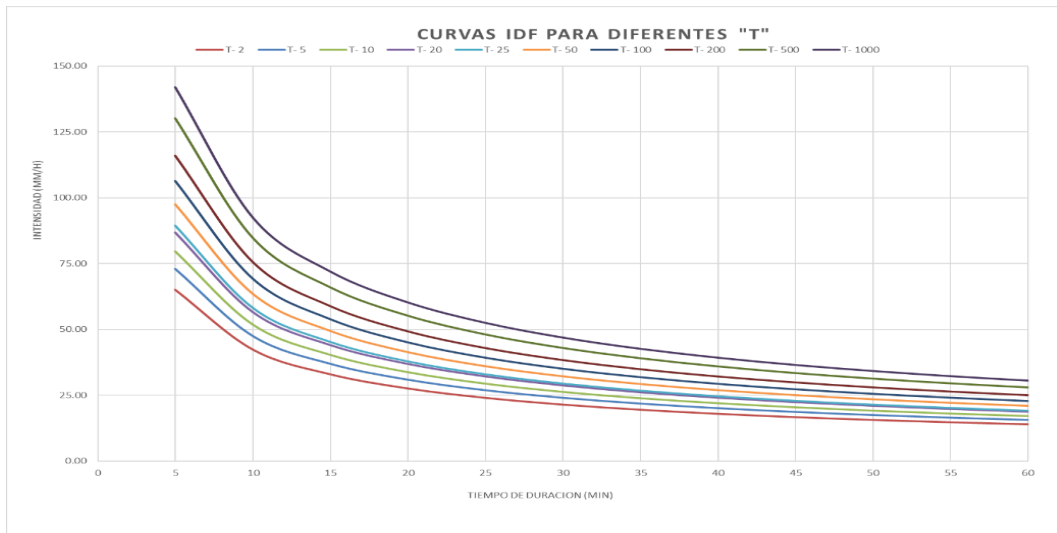
$$I = \frac{161.45885 \cdot T^{0.1255504}}{0.618581 \cdot t}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	65.09	42.39	32.99	27.61	24.05	21.49	19.53	17.98	16.72	15.66	14.77	13.99
T-5	73.02	47.56	37.01	30.98	26.98	24.10	21.91	20.18	18.76	17.57	16.57	15.70
T-10	79.66	51.88	40.37	33.79	29.44	26.30	23.90	22.01	20.46	19.17	18.07	17.13
T-20	86.90	56.60	44.05	36.86	32.11	28.69	26.08	24.01	22.32	20.91	19.72	18.68
T-25	89.37	58.21	45.30	37.91	33.02	29.50	26.82	24.69	22.96	21.51	20.28	19.22
T-50	97.50	63.50	49.42	41.36	36.03	32.18	29.26	26.94	25.05	23.46	22.12	20.96
T-100	106.36	69.28	53.91	45.12	39.30	35.11	31.92	29.39	27.32	25.60	24.13	22.87
T-200	116.03	75.57	58.81	49.22	42.88	38.30	34.82	32.06	29.81	27.93	26.33	24.95
T-500	130.18	84.79	65.98	55.22	48.10	42.97	39.06	35.97	33.44	31.33	29.54	27.99
T-1000	142.02	92.50	71.98	60.24	52.48	46.88	42.62	39.24	36.48	34.18	32.22	30.53





ESTACION MUÑANI

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{102.45682 \cdot T^{0.1661292}}{0.618581 \cdot t}$$

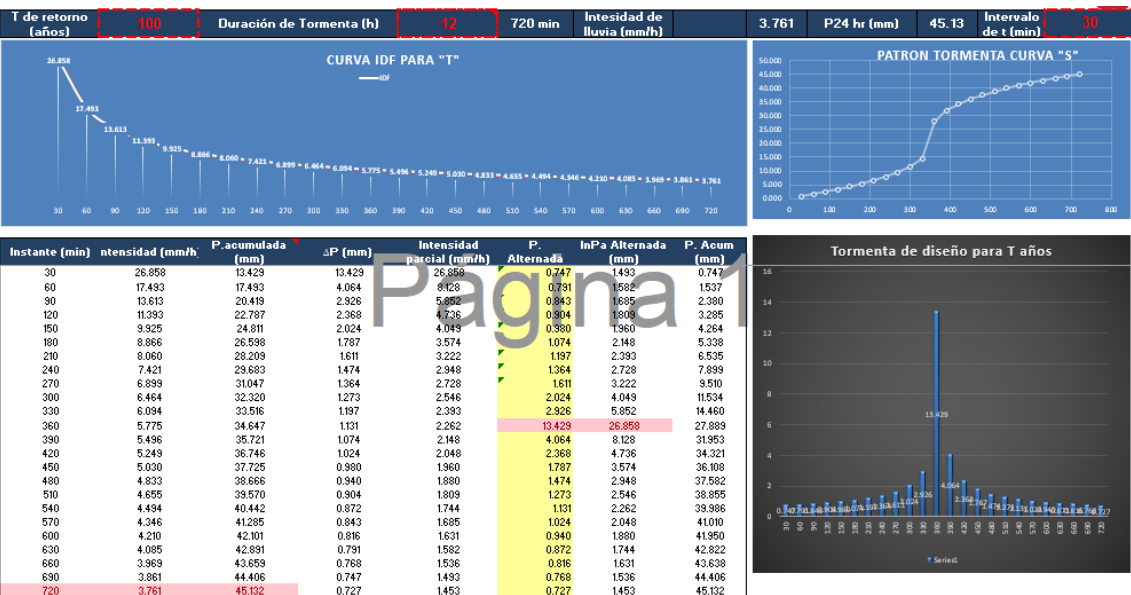
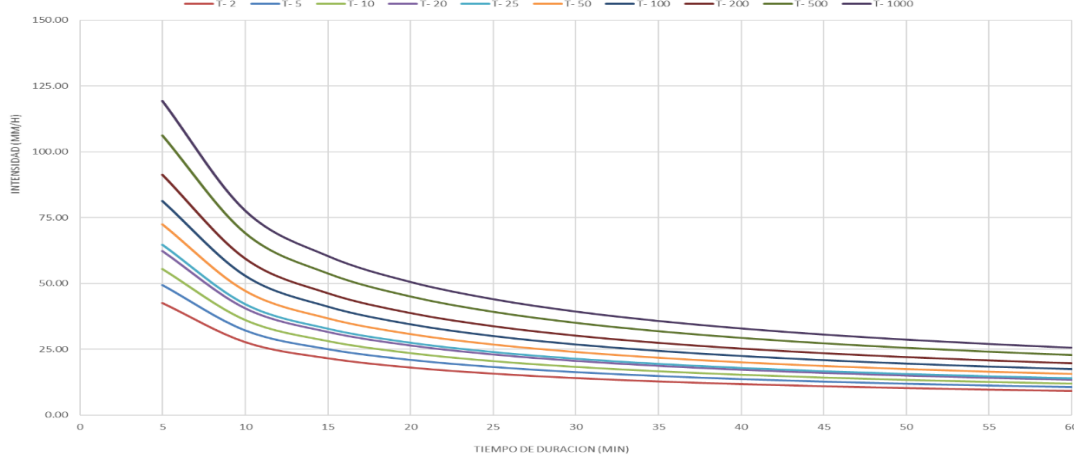
Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años T	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	42.48	27.67	21.53	18.02	15.70	14.02	12.75	11.74	10.91	10.22	9.64	9.13
T-5	49.46	32.22	25.07	20.98	18.28	16.33	14.84	13.67	12.71	11.90	11.22	10.63
T-10	55.50	36.15	28.13	23.54	20.51	18.32	16.65	15.33	14.26	13.36	12.59	11.93
T-20	62.27	40.56	31.56	26.42	23.01	20.56	18.69	17.21	16.00	14.99	14.13	13.39
T-25	64.63	42.09	32.75	27.41	23.88	21.33	19.39	17.86	16.60	15.55	14.66	13.89
T-50	72.51	47.23	36.75	30.76	26.79	23.94	21.76	20.03	18.63	17.45	16.45	15.59
T-100	81.36	52.99	41.24	34.51	30.06	26.86	24.42	22.48	20.90	19.58	18.46	17.49
T-200	91.29	59.46	46.27	38.73	33.73	30.14	27.40	25.22	23.45	21.97	20.71	19.63
T-500	106.30	69.24	53.88	45.09	39.28	35.09	31.90	29.37	27.31	25.58	24.12	22.86
T-1000	119.28	77.69	60.45	50.60	44.07	39.37	35.79	32.96	30.64	28.71	27.06	25.64

CURVAS IDF PARA DIFERENTES "T"





ESTACION MOHO

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

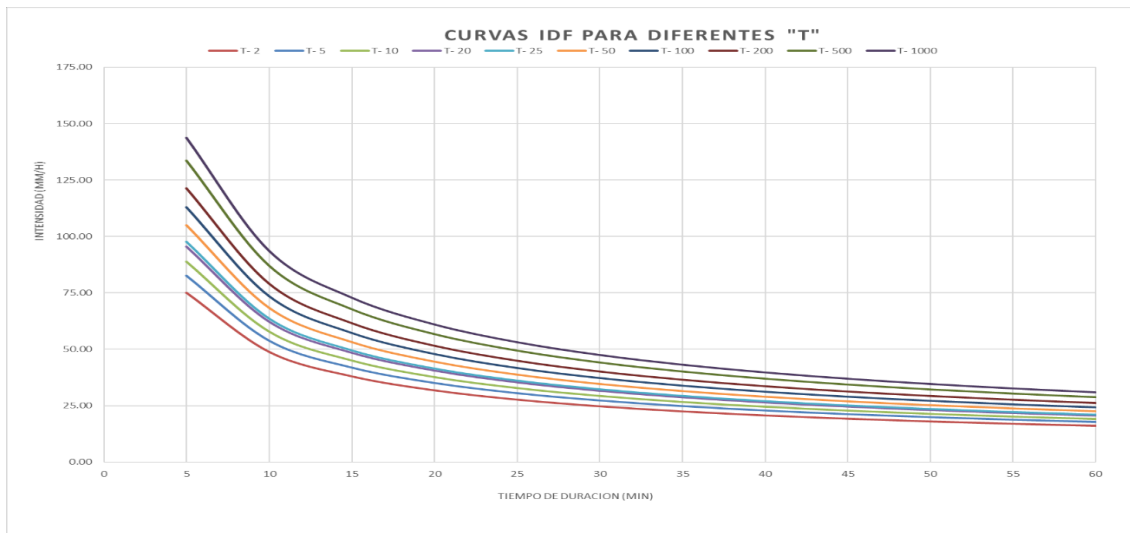
$$I = \frac{188.83500 \cdot T^{0.1045697}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T- 2	75.02	48.86	38.02	31.83	27.72	24.77	22.51	20.73	19.27	18.06	17.02	16.13
T- 5	82.57	53.78	41.85	35.03	30.51	27.26	24.78	22.81	21.21	19.87	18.73	17.75
T- 10	88.77	57.82	44.99	37.66	32.80	29.30	26.64	24.53	22.80	21.36	20.14	19.09
T- 20	95.45	62.17	48.38	40.49	35.27	31.51	28.64	26.37	24.52	22.97	21.66	20.52
T- 25	97.70	63.63	49.52	41.44	36.10	32.25	29.32	26.99	25.10	23.51	22.17	21.01
T- 50	105.04	68.42	53.24	44.56	38.82	34.68	31.52	29.02	26.98	25.28	23.83	22.58
T- 100	112.94	73.56	57.24	47.91	41.73	37.28	33.89	31.20	29.01	27.18	25.63	24.28
T- 200	121.43	79.09	61.54	51.51	44.87	40.08	36.44	33.55	31.19	29.22	27.55	26.11
T- 500	133.64	87.04	67.73	56.69	49.38	44.12	40.10	36.92	34.33	32.16	30.32	28.73
T- 1000	143.69	93.59	72.83	60.95	53.09	47.43	43.12	39.70	36.91	34.58	32.60	30.89



T de retorno (años): 100 **Duración de Tormenta (h): 12** **720 min** **Intensidad de lluvia (mm/h): 5.221** **P24 hr (mm): 62.65** **Intervalo de t (min): 30**

CURVA IDF PARA "T"

PATRON TORMENTA CURVA "S"

Instante (min)	ntensidad (mm/h)	P.acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	37.282	18.641	18.641	37.282	1036	2.073	1036
60	24.282	24.282	6.641	11.822	1098	2.195	2134
90	18.995	28.344	4.061	9.828	1170	2.339	3304
120	15.815	31.621	3.287	8.674	1256	2.511	4559
150	13.776	34.441	2.810	7.820	1360	2.720	5919
180	12.307	36.921	2.480	7.191	1491	2.982	7410
210	11.188	39.157	2.236	6.722	1661	3.322	9071
240	10.301	41.203	2.046	6.392	1833	3.786	10964
270	9.577	43.096	1.893	6.167	2.236	4.472	13200
300	8.973	44.863	1.767	6.014	2.910	5.620	16010
330	8.459	46.524	1.661	5.922	4.061	8.123	20072
360	8.016	48.094	1.570	5.880	18.641	37.282	38.713
390	7.628	49.585	1.491	5.882	5.641	11.282	44.364
420	7.287	51.007	1.422	5.843	3.287	6.674	47.641
450	6.982	52.367	1.360	5.720	2.480	4.961	50.121
480	6.709	53.672	1.305	5.610	2.046	4.092	52.167
490	6.462	54.327	1.256	5.511	1.767	3.534	53.935
540	6.238	55.139	1.211	5.421	1.570	3.140	55.604
570	6.032	57.308	1.170	5.239	1.422	2.943	56.926
600	5.844	58.440	1.132	5.064	1.305	2.810	58.231
630	5.670	59.538	1.098	4.915	1.211	2.421	59.442
660	5.509	60.604	1.066	4.782	1.132	2.264	60.574
690	5.360	61.640	1.036	4.664	1.066	2.132	61.640
720	5.221	62.649	1.009	4.561	1.009	2.018	62.649

Tormenta de diseño para T años



ESTACION PROGRESO

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{133.70340 \cdot T^{0.1009824}}{0.618581 \cdot t}$$

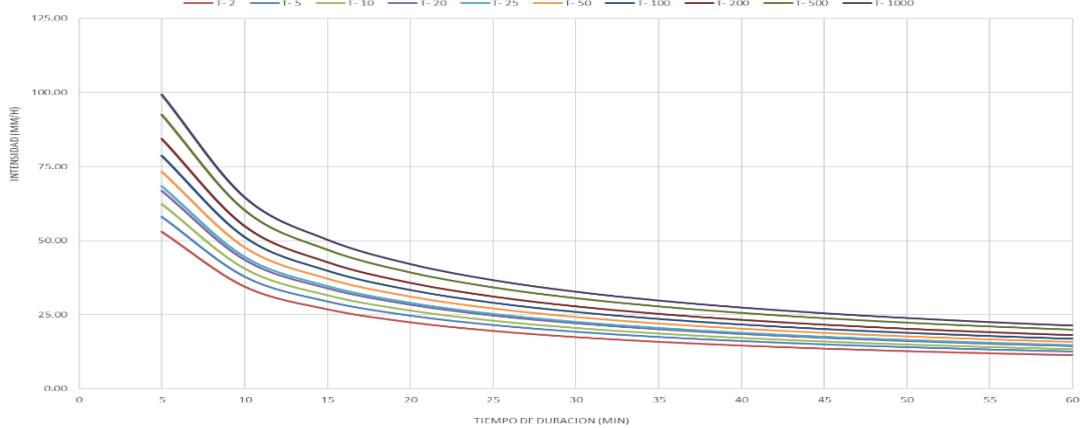
Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

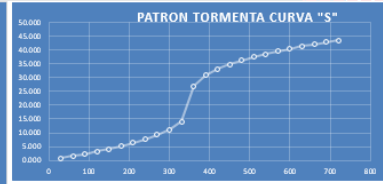
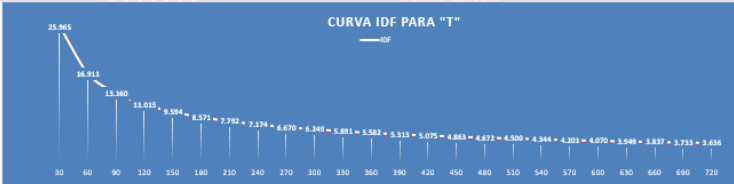
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	52.99	34.51	26.86	22.48	19.58	17.49	15.90	14.64	13.61	12.75	12.02	11.39
T-5	58.12	37.86	29.46	24.66	21.48	19.19	17.44	16.06	14.93	13.99	13.19	12.50
T-10	62.34	40.60	31.59	26.44	23.03	20.58	18.71	17.22	16.01	15.00	14.14	13.40
T-20	66.86	43.55	33.89	28.36	24.70	22.07	20.06	18.47	17.17	16.09	15.17	14.37
T-25	68.38	44.54	34.66	29.01	25.27	22.57	20.52	18.89	17.57	16.46	15.52	14.70
T-50	73.34	47.77	37.17	31.11	27.10	24.21	22.01	20.26	18.84	17.65	16.64	15.77
T-100	78.66	51.23	39.87	33.37	29.06	25.96	23.60	21.73	20.21	18.93	17.85	16.91
T-200	84.36	54.94	42.76	35.79	31.17	27.85	25.31	23.31	21.67	20.30	19.14	18.14
T-500	92.54	60.27	46.90	39.26	34.19	30.55	27.77	25.57	23.77	22.27	21.00	19.90
T-1000	99.25	64.64	50.30	42.10	36.67	32.76	29.78	27.42	25.49	23.89	22.52	21.34

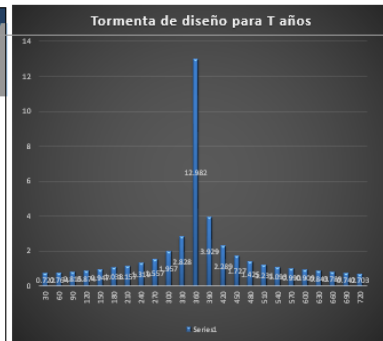
CURVAS IDF PARA DIFERENTES "T"



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.636	P24 hr (mm)	43.63	Intervalo de t (min)	30
---------------------	-----	--------------------------	----	---------	-----------------------------	-------	-------------	-------	----------------------	----



Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	25.965	12.982	12.982	25.965	0.222	1443	0.722
60	16.911	16.911	3.929	7.858	0.764	1529	1.486
90	13.160	19.740	2.828	5.657	0.815	1623	2.301
120	11.015	22.029	2.289	4.573	0.874	1749	3.175
150	9.594	23.906	1.957	3.914	0.947	1894	4.122
180	8.571	25.710	1.727	3.455	1.036	2.077	5.161
210	7.792	27.271	1.557	3.114	1.187	2.313	6.318
240	7.174	28.695	1.425	2.850	1.319	2.637	7.636
270	6.670	30.014	1.319	2.637	1.557	3.114	9.193
300	6.249	31.245	1.231	2.461	1.857	3.914	11.150
330	5.891	32.401	1.157	2.313	2.282	5.657	13.979
360	5.582	33.495	1.093	2.187	2.828	25.965	26.961
390	5.310	34.533	1.038	2.077	3.429	7.858	30.890
420	5.075	35.523	0.990	1.990	4.093	4.579	33.179
450	4.863	36.470	0.947	1.894	4.727	3.455	34.907
480	4.672	37.379	0.909	1.818	5.328	2.850	36.332
510	4.500	38.254	0.874	1.749	5.891	2.461	37.562
540	4.344	39.097	0.843	1.686	6.429	2.187	38.656
570	4.201	39.912	0.815	1.623	6.929	1.980	39.646
600	4.070	40.700	0.789	1.577	7.393	1.818	40.555
630	3.949	41.465	0.764	1.529	7.828	1.686	41.398
660	3.837	42.207	0.742	1.485	8.239	1.577	42.186
690	3.733	42.929	0.722	1.443	8.628	1.485	42.929
720	3.636	43.631	0.703	1.405	9.000	1.405	43.631



ESTACION PUTINA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{140.96533 \cdot T^{0.1037035}}{0.618581 \cdot t}$$

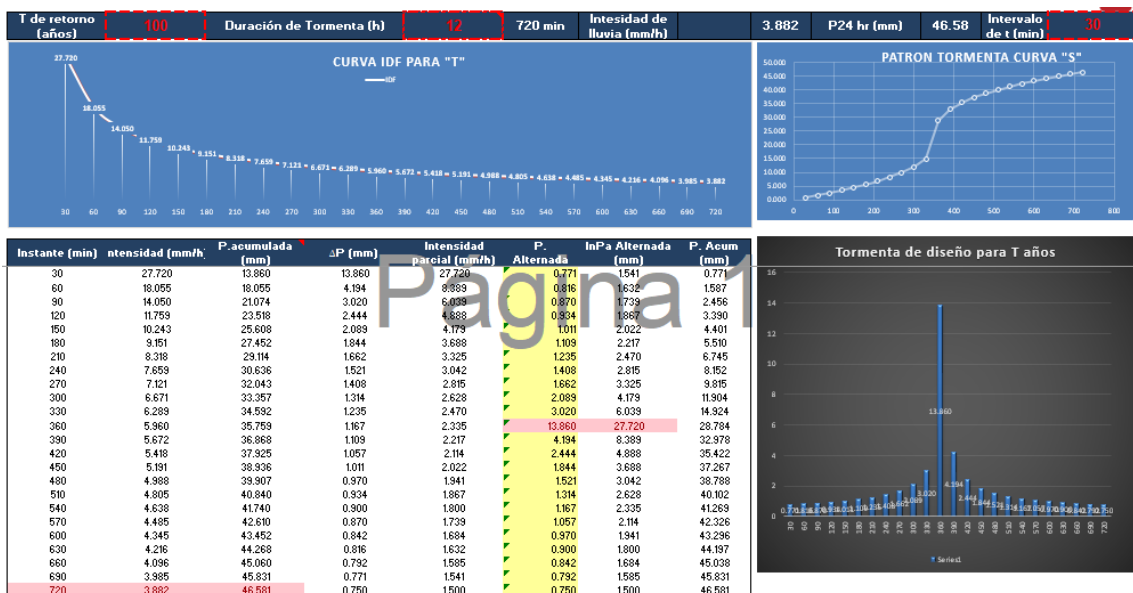
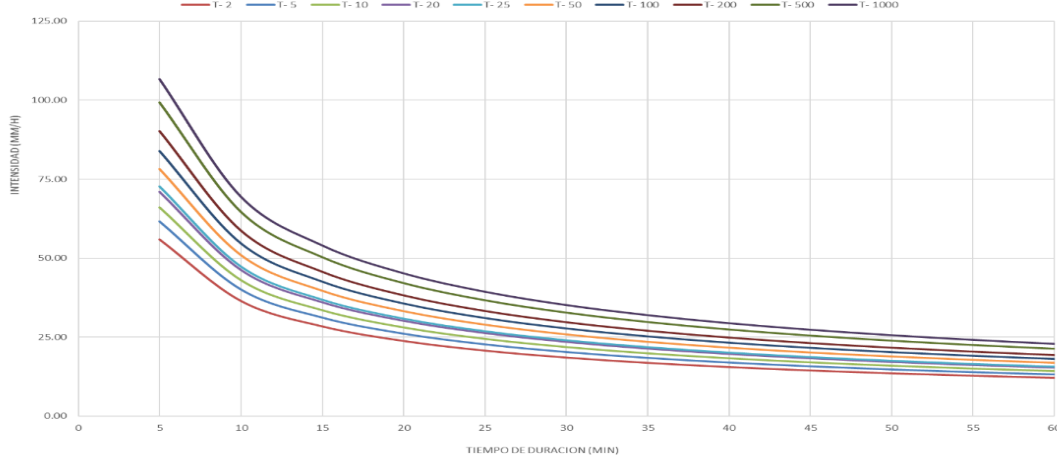
Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	55.97	36.45	28.37	23.74	20.68	18.48	16.80	15.46	14.38	13.47	12.70	12.03
T-5	61.55	40.09	31.20	26.11	22.74	20.32	18.47	17.01	15.81	14.81	13.97	13.23
T-10	66.14	43.08	33.52	28.06	24.44	21.83	19.85	18.27	16.99	15.92	15.01	14.22
T-20	71.07	46.29	36.02	30.15	26.26	23.46	21.33	19.63	18.26	17.10	16.12	15.28
T-25	72.73	47.37	36.86	30.85	26.87	24.01	21.82	20.09	18.68	17.50	16.50	15.64
T-50	78.15	50.90	39.61	33.15	28.88	25.80	23.45	21.59	20.07	18.81	17.73	16.80
T-100	83.97	54.69	42.56	35.62	31.03	27.72	25.20	23.20	21.57	20.21	19.05	18.05
T-200	90.23	58.77	45.73	38.28	33.34	29.79	27.08	24.93	23.18	21.72	20.47	19.40
T-500	99.23	64.63	50.29	42.09	36.67	32.76	29.78	27.42	25.49	23.88	22.51	21.33
T-1000	106.62	69.45	54.04	45.23	39.40	35.20	32.00	29.46	27.39	25.66	24.19	22.92

CURVAS IDF PARA DIFERENTES "T"



ANEXO 6. Curvas IDF e hietograma para RCP 4.5

ESTACION ANANEA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{95.35711 \cdot T^{0.1140484}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

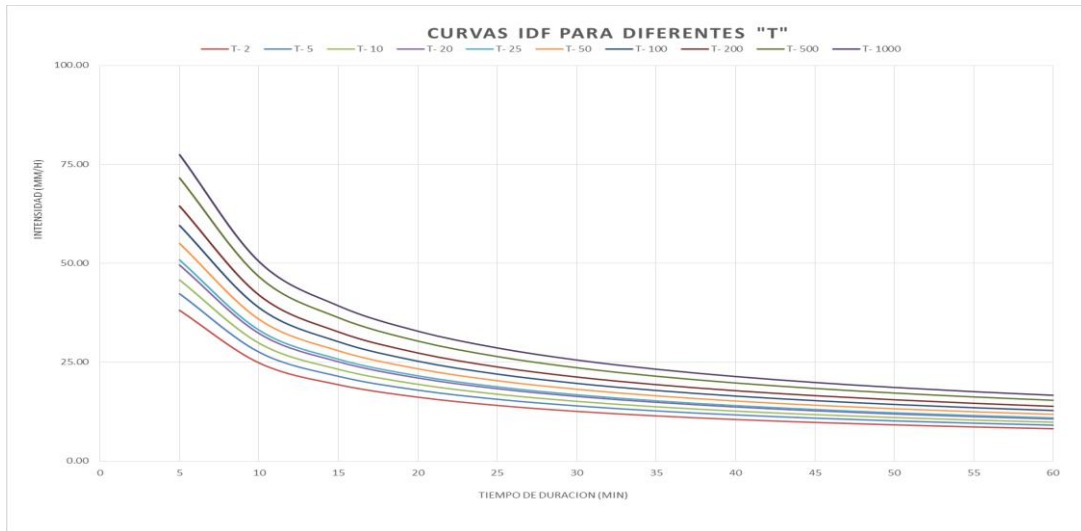
I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Período de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	38.13	24.84	19.33	16.18	14.09	12.59	11.44	10.54	9.80	9.18	8.65	8.20
T-5	42.34	27.57	21.46	17.96	15.64	13.97	12.70	11.70	10.87	10.19	9.61	9.10
T-10	45.82	29.84	23.22	19.44	16.93	15.12	13.75	12.66	11.77	11.03	10.40	9.85
T-20	49.59	32.30	25.13	21.03	18.32	16.37	14.88	13.70	12.74	11.93	11.25	10.66
T-25	50.86	33.13	25.78	21.58	18.80	16.79	15.26	14.05	13.07	12.24	11.54	10.94
T-50	55.05	35.85	27.90	23.35	20.34	18.17	16.52	15.21	14.14	13.25	12.49	11.84
T-100	59.58	38.80	30.20	25.27	22.01	19.67	17.88	16.46	15.30	14.34	13.52	12.81
T-200	64.48	42.00	32.68	27.35	23.83	21.28	19.35	17.81	16.56	15.52	14.63	13.86
T-500	71.58	46.62	36.28	30.37	26.45	23.63	21.48	19.78	18.39	17.23	16.24	15.39
T-1000	77.47	50.46	39.26	32.86	28.63	25.57	23.25	21.40	19.90	18.64	17.58	16.66



T de retorno (años): **100**
Duración de Tormenta (h): **12**
720 min
Intensidad de lluvia (mm/h): **2.754**
P24 hr (mm): **33.05**
Intervalo de t (min): **30**

CURVA IDF PARA "T"

PATRON TORMENTA CURVA "S"

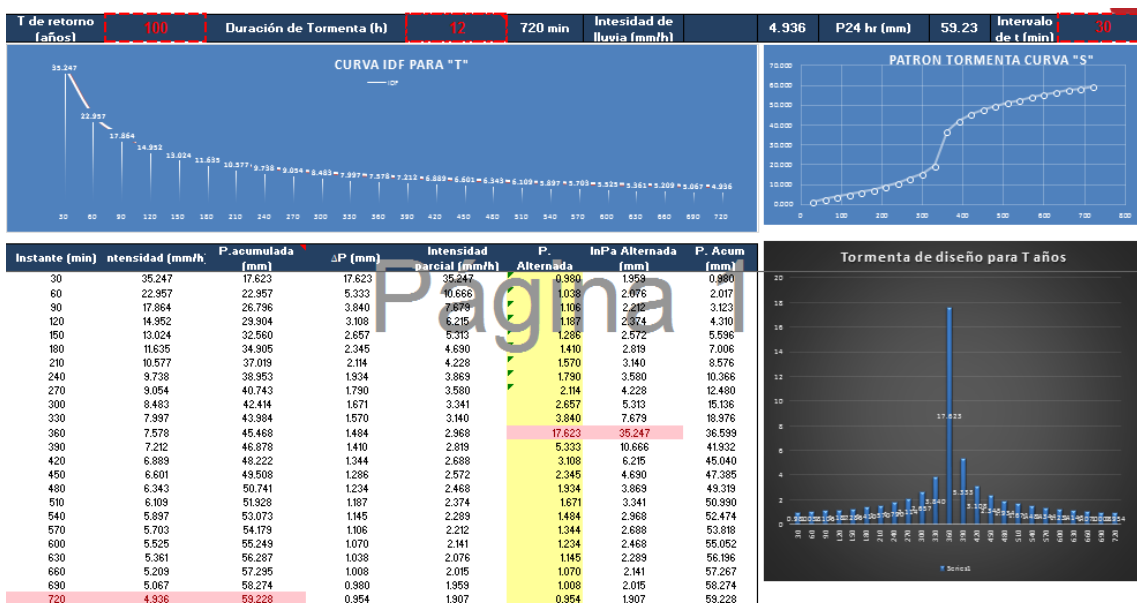
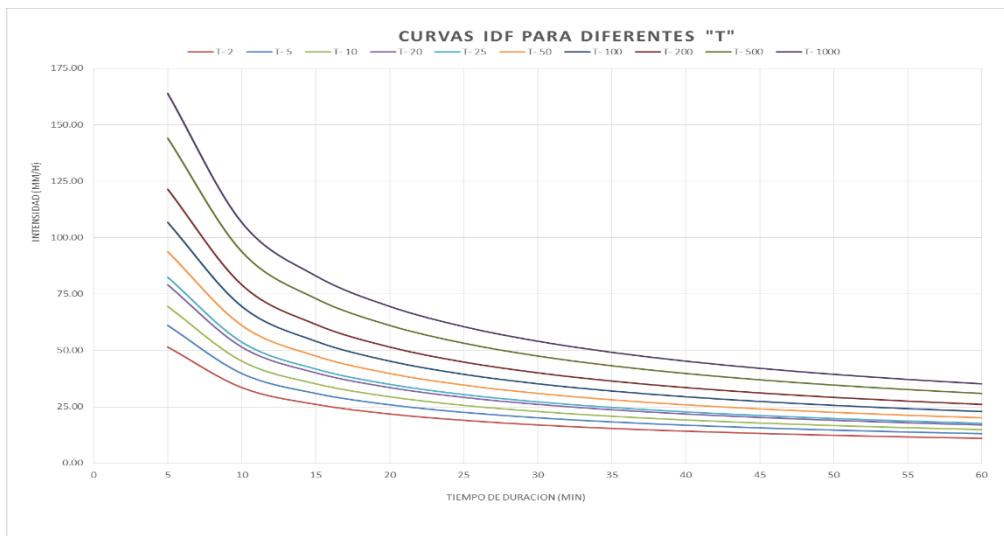
Instante (min)	intensidad (mm/h)	P-acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P-Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P-Acum (mm)
30	19.667	5.833	5.833	19.667	0.542	1.033	0.847
60	12.809	12.809	2.976	6.952	0.573	1.468	1.126
90	9.968	19.351	2.142	4.689	0.611	1.743	1.343
120	8.243	25.695	1.724	3.459	0.648	1.925	1.495
150	7.267	30.168	1.482	2.955	0.717	1.436	1.322
180	6.482	34.476	1.308	2.617	0.786	1.573	1.309
210	5.902	38.656	1.179	2.359	0.876	1.752	1.478
240	5.434	42.735	1.079	2.159	0.989	1.937	1.574
270	5.052	46.734	0.999	1.997	1.173	2.359	1.683
300	4.733	50.666	0.932	1.864	1.482	2.965	1.846
330	4.462	54.542	0.876	1.752	2.142	4.285	20.421
360	4.228	58.370	0.826	1.656	3.833	19.667	20.421
390	4.024	62.166	0.786	1.573	2.976	5.392	23.397
420	3.844	65.906	0.750	1.500	1.734	3.468	25.131
450	3.683	69.624	0.717	1.435	1.308	2.617	26.439
480	3.539	73.312	0.686	1.377	1.079	2.159	27.519
510	3.409	76.975	0.662	1.325	1.325	1.964	28.451
540	3.290	80.613	0.639	1.277	0.826	1.656	29.279
570	3.182	84.230	0.617	1.234	0.750	1.500	30.029
600	3.083	87.827	0.597	1.195	1.195	1.377	30.717
630	2.991	91.407	0.579	1.158	0.639	1.277	31.356
660	2.906	94.969	0.562	1.124	0.597	1.195	31.953
690	2.827	98.515	0.547	1.093	0.562	1.124	32.515
720	2.754	102.048	0.532	1.064	0.532	1.064	33.048

Tormenta de diseño para T años



ESTACION COJATA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF												
$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$		$I = \frac{122.60470 \cdot T^{0.1861651}}{t^{0.618581}}$		Donde: I = intensidad de precipitación (mm/hr) T = Período de Retorno (años) t = Tiempo de duración de precipitación (min)								
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración												
años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	51.54	33.57	26.12	21.87	19.05	17.01	15.47	14.24	13.24	12.41	11.69	11.08
T-5	61.13	39.82	30.98	25.93	22.59	20.18	18.34	16.89	15.70	14.71	13.87	13.14
T-10	69.55	45.30	35.25	29.50	25.70	22.96	20.87	19.22	17.87	16.74	15.78	14.95
T-20	79.13	51.54	40.11	33.57	29.24	26.12	23.75	21.86	20.33	19.04	17.95	17.01
T-25	82.49	53.72	41.81	34.99	30.48	27.23	24.75	22.79	21.19	19.85	18.72	17.73
T-50	93.85	61.12	47.57	39.81	34.68	30.98	28.16	25.93	24.11	22.59	21.29	20.18
T-100	106.77	69.54	54.12	45.29	39.45	35.25	32.04	29.50	27.43	25.70	24.23	22.96
T-200	121.48	79.12	61.57	51.53	44.89	40.10	36.45	33.56	31.21	29.24	27.56	26.12
T-500	144.08	93.84	73.02	61.12	53.24	47.56	43.23	39.81	37.01	34.67	32.69	30.98
T-1000	163.92	106.76	83.08	69.54	60.57	54.11	49.19	45.29	42.11	39.45	37.19	35.24





ESTACION HUANCANÉ

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

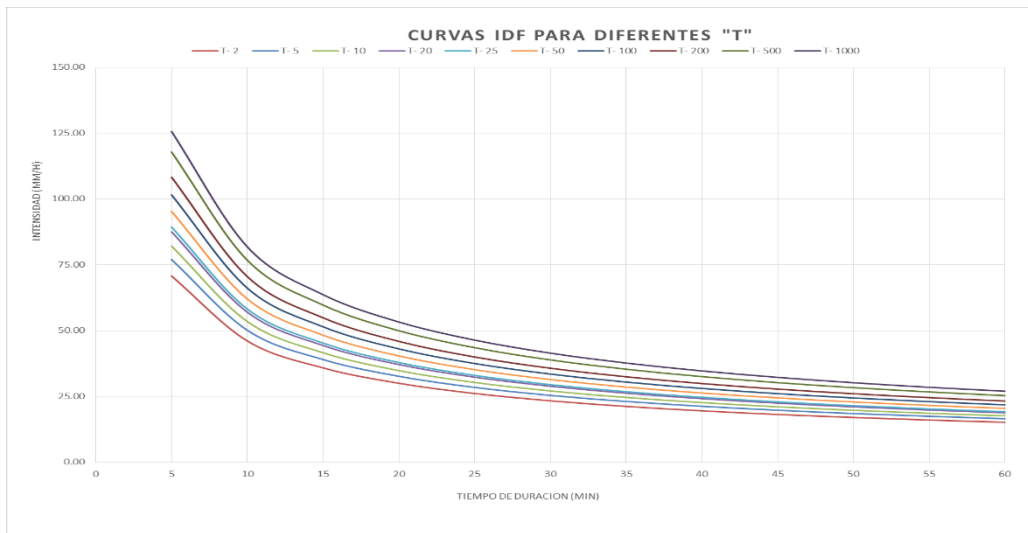
$$I = \frac{179.67181 \cdot T^{0.0923606}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	70.78	46.10	35.87	30.03	26.15	23.36	21.24	19.56	18.18	17.03	16.06	15.22
T-5	77.03	50.17	39.04	32.68	28.46	25.43	23.12	21.28	19.79	18.54	17.48	16.56
T-10	82.12	53.49	41.62	34.84	30.35	27.11	24.64	22.69	21.10	19.76	18.63	17.66
T-20	87.55	57.02	44.37	37.14	32.35	28.90	26.27	24.19	22.49	21.07	19.86	18.82
T-25	89.38	58.21	45.30	37.91	33.03	29.50	26.82	24.69	22.96	21.51	20.28	19.22
T-50	95.29	62.06	48.29	40.42	35.21	31.45	28.59	26.33	24.48	22.93	21.62	20.49
T-100	101.59	66.16	51.49	43.09	37.54	33.53	30.48	28.07	26.09	24.45	23.05	21.84
T-200	108.30	70.54	54.89	45.94	40.02	35.75	32.50	29.92	27.82	26.06	24.57	23.28
T-500	117.87	76.77	59.74	50.00	43.55	38.91	35.37	32.57	30.28	28.37	26.74	25.34
T-1000	125.66	81.84	63.69	53.31	46.43	41.48	37.71	34.72	32.28	30.24	28.51	27.02



T de retorno (años): **100** Duración de Tormenta (h): **12** 720 min Intensidad de lluvia (mm/h): **4.696** P24 hr (mm): **56.35** Intervalo de t (min): **30**

CURVA IDF PARA "T"

PATRON TORMENTA CURVA "S"

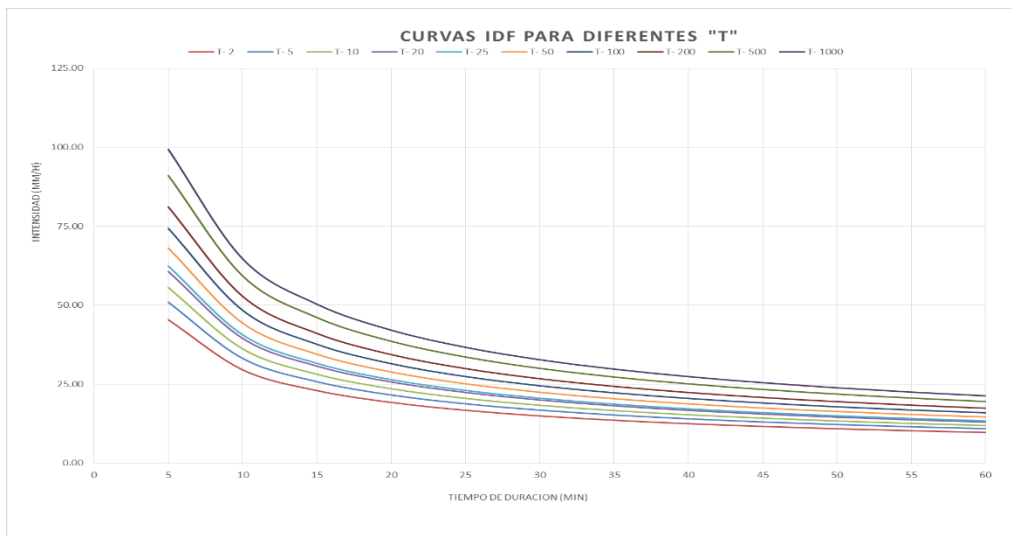
Instante (min)	Intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	33.534	16.767	16.767	33.534	0.932	1.864	0.932
60	21.841	21.841	5.074	10.148	0.907	1.975	1.975
90	16.996	25.434	3.653	7.906	1.052	2.104	2.972
120	14.225	28.480	2.957	5.913	1.128	2.269	4.101
150	12.391	30.978	2.527	5.095	1.223	2.447	5.324
180	11.070	33.209	2.231	4.462	1.341	2.682	6.665
210	10.063	35.220	2.011	4.022	1.494	2.988	8.159
240	9.285	37.060	1.840	3.681	1.703	3.406	9.862
270	8.614	38.763	1.703	3.406	2.011	4.022	11.873
300	8.071	40.353	1.589	3.179	2.527	5.055	14.401
330	7.606	41.846	1.494	2.980	3.853	7.306	18.054
360	7.210	43.259	1.412	2.824	4.676	8.820	23.820
390	6.861	44.600	1.341	2.682	5.074	10.148	29.894
420	6.554	45.878	1.279	2.557	5.913	12.261	37.155
450	6.280	47.102	1.223	2.447	7.206	15.067	45.082
480	6.034	48.275	1.174	2.348	8.681	18.548	54.442
510	5.812	49.405	1.129	2.259	1.018	2.037	56.350
540	5.610	50.494	1.089	2.178	1.412	2.824	49.924
570	5.426	51.546	1.052	2.104	1.279	2.557	51.202
600	5.256	52.564	1.018	2.037	1.174	2.348	52.376
630	5.100	53.551	0.987	1.975	1.089	2.178	53.465
660	4.955	54.510	0.959	1.917	1.018	2.037	54.484
690	4.821	55.442	0.932	1.864	0.959	1.917	55.442
720	4.696	56.350	0.907	1.815	0.907	1.815	56.350

Tormenta de diseño para T años



ESTACION MUÑANI

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF												
$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$		$I = \frac{112.67917 \cdot T^{0.1259210}}{t^{0.618581}}$		Donde: I = intensidad de precipitación (mm/hr) T = Período de Retorno (años) t = Tiempo de duración de precipitación (min)								
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración												
años T	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	45.43	29.59	23.03	19.27	16.79	15.00	13.63	12.55	11.67	10.93	10.31	9.77
T-5	50.99	33.21	25.84	21.63	18.84	16.83	15.30	14.09	13.10	12.27	11.57	10.96
T-10	55.64	36.24	28.20	23.60	20.56	18.37	16.70	15.37	14.29	13.39	12.62	11.96
T-20	60.72	39.54	30.77	25.76	22.44	20.04	18.22	16.78	15.60	14.61	13.78	13.05
T-25	62.45	40.67	31.65	26.49	23.07	20.61	18.74	17.25	16.04	15.03	14.17	13.43
T-50	68.14	44.38	34.54	28.91	25.18	22.49	20.45	18.83	17.50	16.40	15.46	14.65
T-100	74.36	48.43	37.69	31.54	27.48	24.55	22.31	20.54	19.10	17.90	16.87	15.99
T-200	81.14	52.85	41.12	34.42	29.98	26.78	24.35	22.42	20.84	19.53	18.41	17.44
T-500	91.06	59.31	46.15	38.63	33.65	30.06	27.33	25.16	23.39	21.92	20.66	19.58
T-1000	99.37	64.72	50.36	42.15	36.72	32.80	29.82	27.45	25.52	23.91	22.55	21.36

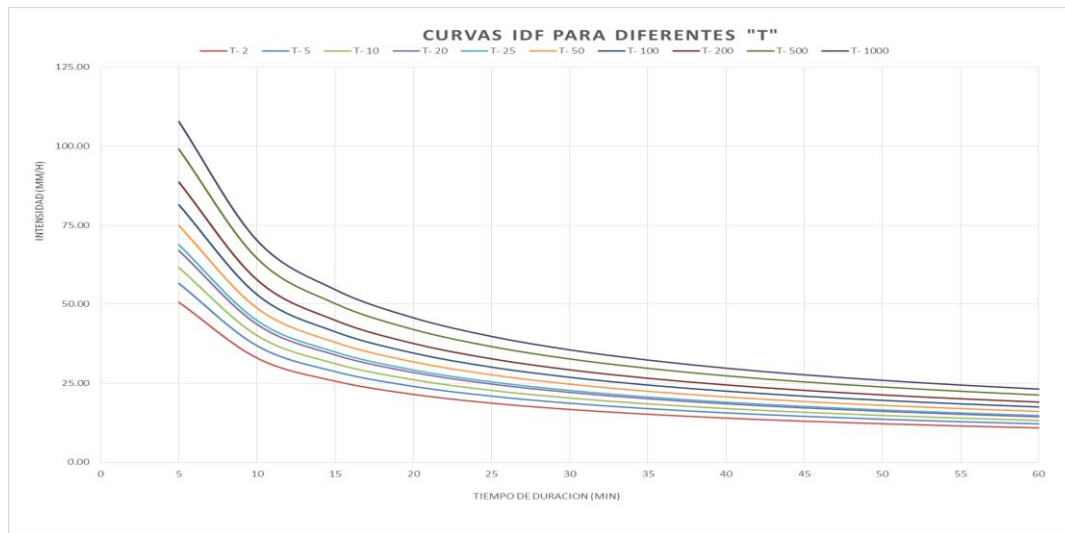


T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.437	P24 hr (mm)	41.25	Intervalo de t (min)	30
CURVA IDF PARA "T"										
PATRON TORMENTA CURVA "S"										
Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)			
30	24.545	12.273	12.273	24.545	0.882	1.354	0.882			
60	15.987	15.987	3.714	7.428	0.723	1.445	1.405			
90	12.440	18.660	2.674	5.348	0.770	1.540	2.175			
120	10.412	20.824	2.164	4.328	0.827	1.653	3.002			
150	9.070	22.674	1.850	3.700	0.895	1.791	3.897			
180	8.102	24.307	1.633	3.266	0.982	1.963	4.879			
210	7.366	25.779	1.472	2.944	1.093	2.187	5.972			
240	6.782	27.126	1.347	2.694	1.246	2.493	7.219			
270	6.305	28.373	1.246	2.493	1.472	2.944	8.691			
300	5.907	29.536	1.163	2.327	1.860	3.700	10.541			
330	5.569	30.630	1.093	2.187	2.674	5.348	13.214			
360	5.277	31.663	1.034	2.067	12.273	24.545	25.487			
390	5.022	32.645	0.982	1.963	3.714	7.428	29.201			
420	4.797	33.581	0.936	1.872	2.164	4.328	31.365			
450	4.597	34.476	0.895	1.791	1.633	3.266	32.998			
480	4.417	35.335	0.859	1.718	1.347	2.694	34.345			
510	4.254	36.162	0.827	1.653	2.327	3.508	35.508			
540	4.107	36.959	0.797	1.594	1.034	2.067	36.542			
570	3.971	37.729	0.770	1.540	0.936	1.872	37.478			
600	3.847	38.475	0.745	1.491	0.859	1.718	38.337			
630	3.733	39.197	0.723	1.445	0.797	1.594	39.134			
660	3.627	39.899	0.702	1.403	0.745	1.491	39.880			
690	3.529	40.581	0.682	1.364	0.702	1.403	40.581			
720	3.437	41.245	0.664	1.328	0.664	1.328	41.245			



ESTACION PROGRESO

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF												
$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$		$I = \frac{126.09978 \cdot T^{0.1214883}}{t^{0.618581}}$		Donde: I = intensidad de precipitación (mm/hr) T = Período de Retorno (años) t = Tiempo de duración de precipitación (min)								
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración												
años T	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	50.69	33.01	25.69	21.50	18.73	16.73	15.21	14.00	13.02	12.20	11.50	10.90
T-5	56.66	36.90	28.72	24.03	20.94	18.70	17.00	15.65	14.55	13.64	12.86	12.18
T-10	61.64	40.14	31.24	26.15	22.78	20.35	18.50	17.03	15.83	14.83	13.98	13.25
T-20	67.05	43.67	33.98	28.44	24.78	22.13	20.12	18.53	17.22	16.14	15.21	14.42
T-25	68.89	44.87	34.92	29.23	25.46	22.74	20.67	19.03	17.70	16.58	15.63	14.81
T-50	74.95	48.81	37.98	31.79	27.69	24.74	22.49	20.71	19.25	18.04	17.00	16.11
T-100	81.53	53.10	41.32	34.59	30.13	26.91	24.47	22.53	20.94	19.62	18.50	17.53
T-200	88.69	57.77	44.95	37.62	32.77	29.28	26.62	24.51	22.78	21.35	20.12	19.07
T-500	99.14	64.57	50.25	42.05	36.63	32.73	29.75	27.39	25.47	23.86	22.49	21.31
T-1000	107.85	70.24	54.66	45.75	39.85	35.60	32.36	29.80	27.70	25.96	24.47	23.19

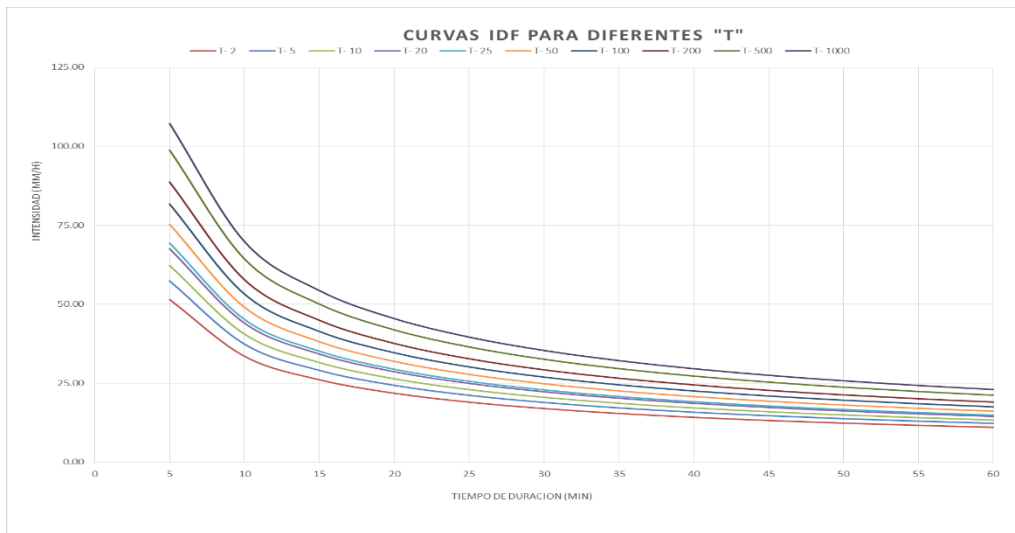


T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.769	P24 hr (mm)	45.23	Intervalo de t (min)	30
CURVA IDF PARA "T"										
PATRON TORMENTA CURVA "S"										
Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)			
30	26.914	13.457	13.457	26.914	0.748	1.496	0.748			
60	17.529	17.529	4.072	8.145	0.792	1.585	1.541			
90	13.941	20.481	2.932	6.864	0.844	1.689	2.385			
120	11.417	22.834	2.373	4.746	0.906	1.813	3.231			
150	9.945	24.862	2.029	4.057	0.982	1.964	4.273			
180	8.884	26.653	1.790	3.581	1.076	2.153	5.349			
210	8.076	28.267	1.614	3.228	1.199	2.398	6.548			
240	7.436	29.744	1.477	2.954	1.367	2.733	7.915			
270	6.913	31.111	1.367	2.733	1.614	3.228	9.529			
300	6.477	32.386	1.276	2.551	2.029	4.057	11.958			
330	6.106	33.595	1.199	2.398	2.592	5.364	14.499			
360	5.796	34.719	1.133	2.267	3.457	7.246	17.946			
390	5.507	35.795	1.076	2.153	4.072	8.145	22.019			
420	5.260	36.821	1.026	2.052	4.746	8.746	26.765			
450	5.040	37.803	0.982	1.964	5.364	9.199	32.164			
480	4.843	38.745	0.942	1.884	5.954	9.509	37.659			
510	4.665	39.651	0.906	1.813	6.519	9.713	43.144			
540	4.503	40.525	0.874	1.748	7.062	9.842	48.618			
570	4.356	41.370	0.844	1.689	7.584	9.906	54.082			
600	4.219	42.187	0.817	1.635	8.094	9.992	59.536			
630	4.093	42.979	0.792	1.585	8.592	10.099	64.980			
660	3.977	43.749	0.769	1.539	9.078	10.226	70.414			
690	3.869	44.497	0.748	1.496	9.543	10.373	75.838			
720	3.769	45.225	0.728	1.456	10.000	10.539	81.253			



ESTACION PUTINA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF												
$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$		$I = \frac{128.55174 \cdot T^{0.1178966}}{t^{0.618581}}$		Donde:		I = intensidad de precipitación (mm/hr) T = Período de Retorno (años) t = Tiempo de duración de precipitación (min)						
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración												
años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	51.55	33.57	26.13	21.87	19.05	17.02	15.47	14.24	13.24	12.41	11.70	11.08
T-5	57.43	37.40	29.11	24.36	21.22	18.96	17.23	15.87	14.75	13.82	13.03	12.35
T-10	62.32	40.59	31.58	26.44	23.03	20.57	18.70	17.22	16.01	15.00	14.14	13.40
T-20	67.62	44.04	34.27	28.69	24.99	22.32	20.29	18.68	17.37	16.27	15.34	14.54
T-25	69.43	45.22	35.19	29.45	25.65	22.92	20.83	19.18	17.83	16.71	15.75	14.93
T-50	75.34	49.07	38.18	31.96	27.84	24.87	22.61	20.82	19.35	18.13	17.09	16.20
T-100	81.75	53.25	41.43	34.68	30.21	26.99	24.53	22.59	21.00	19.68	18.55	17.58
T-200	88.71	57.78	44.96	37.63	32.78	29.28	26.62	24.51	22.79	21.35	20.13	19.07
T-500	98.83	64.37	50.09	41.93	36.52	32.63	29.66	27.31	25.39	23.79	22.42	21.25
T-1000	107.25	69.85	54.36	45.50	39.63	35.40	32.18	29.63	27.55	25.81	24.33	23.06



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.779	P24 hr (mm)	45.35	Intervalo de t (min)	30
CURVA IDF PARA "T"										
PATRON TORMENTA CURVA "S"										
Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	lnPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)			
30	26.987	13.493	13.493	26.987	0.750	1500	0.750			
60	17.577	17.577	4.083	8.167	0.795	1583	1.545			
90	13.678	20.517	2.940	5.880	0.847	1639	2.391			
120	11.449	22.836	2.379	4.753	0.908	1685	3.200			
150	9.972	24.930	2.034	4.063	0.984	1723	4.285			
180	8.908	26.725	1.795	3.591	1.079	1758	5.364			
210	8.098	28.344	1.618	3.237	1.202	2.405	6.566			
240	7.456	29.825	1.481	2.962	1.370	2.741	7.937			
270	6.932	31.195	1.370	2.741	1.518	3.237	9.555			
300	6.495	32.474	1.279	2.558	1.634	4.068	11.583			
330	6.123	33.677	1.202	2.405	1.740	5.890	14.529			
360	5.802	34.813	1.136	2.273	1.833	8.637	20.022			
390	5.522	35.892	1.079	2.158	1.913	11.917	28.022			
420	5.274	36.921	1.029	2.058	1.979	16.043	39.041			
450	5.054	37.906	0.984	1.969	1.795	20.558	53.280			
480	4.856	38.850	0.945	1.889	1.481	2.962	67.761			
510	4.678	39.759	0.909	1.818	1.279	2.558	82.419			
540	4.515	40.636	0.876	1.753	1.136	2.273	97.152			
570	4.367	41.482	0.847	1.693	1.029	2.058	111.959			
600	4.230	42.302	0.820	1.639	0.945	1.889	126.730			
630	4.104	43.096	0.795	1.589	0.876	1.753	141.467			
660	3.988	43.868	0.772	1.543	0.820	1.639	156.169			
690	3.880	44.618	0.750	1.500	0.772	1.543	170.827			
720	3.779	45.348	0.730	1.460	0.730	1.460	185.446			

ANEXO 7. Curvas IDF e hietograma para RCP 8.5

ESTACION ANANEA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

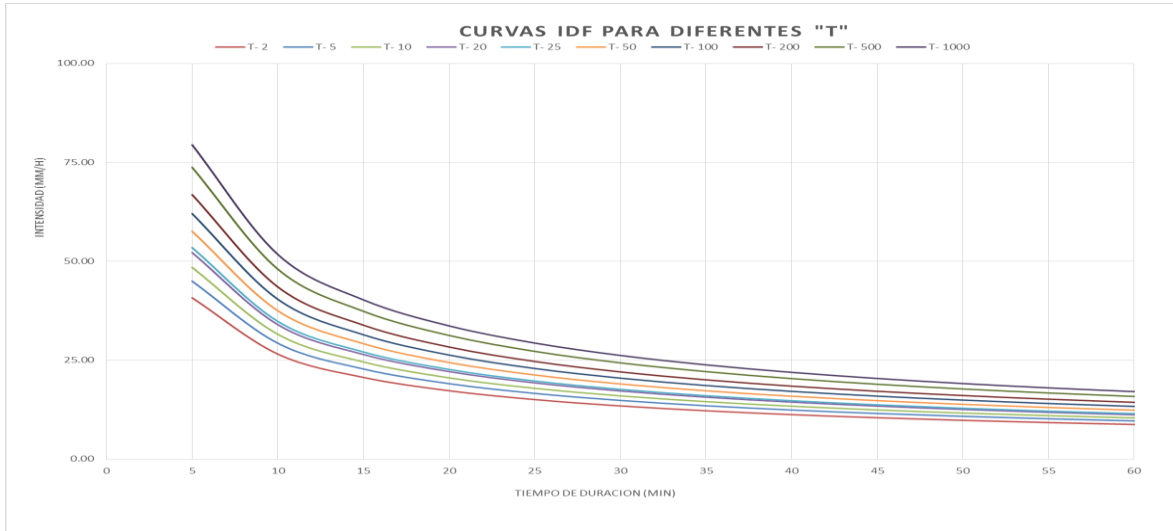
$$I = \frac{102.45113 \cdot T^{0.1073058}}{0.618581 \cdot t}$$

Donde:

- I = intensidad de precipitación (mm/hr)
- T = Período de Retorno (años)
- t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años T	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	40.78	28.56	20.67	17.30	15.07	13.46	12.24	11.27	10.48	9.81	9.25	8.77
T-5	44.99	29.30	22.80	19.09	16.63	14.85	13.50	12.43	11.56	10.83	10.21	9.67
T-10	48.47	31.57	24.56	20.56	17.91	16.00	14.54	13.39	12.45	11.66	11.00	10.42
T-20	52.21	34.01	26.46	22.15	19.29	17.23	15.67	14.43	13.41	12.57	11.85	11.23
T-25	53.48	34.83	27.10	22.68	19.76	17.65	16.05	14.77	13.74	12.87	12.13	11.50
T-50	57.60	37.52	29.20	24.44	21.29	19.02	17.29	15.92	14.80	13.86	13.07	12.38
T-100	62.05	40.42	31.45	26.32	22.93	20.48	18.62	17.14	15.94	14.93	14.08	13.34
T-200	66.84	43.54	33.88	28.36	24.70	22.07	20.06	18.47	17.17	16.09	15.17	14.37
T-500	73.75	48.03	37.38	31.29	27.25	24.35	22.13	20.38	18.94	17.75	16.73	15.86
T-1000	79.44	51.74	40.26	33.70	29.36	26.22	23.84	21.95	20.41	19.12	18.03	17.08



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	2.868	P24 hr (mm)	34.42	Intervalo de t (mm)	30
---------------------	-----	--------------------------	----	---------	-----------------------------	-------	-------------	-------	---------------------	----

CURVA IDF PARA "T"

PATRON TORMENTA CURVA "S"

Instante (min)	intensidad (mm/h)	P.acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	lnPs Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	20.484	10.242	10.242	20.484	0.569	1.138	0.869
60	13.341	13.341	3.089	6.193	1.286	1.172	1.172
90	10.382	15.973	2.231	4.489	1.385	1.615	1.615
120	8.689	17.379	1.806	3.512	1.380	2.505	2.505
150	7.569	18.923	1.544	3.083	1.747	3.252	3.252
180	6.762	20.285	1.363	2.725	0.819	1.638	4.071
210	6.147	21514	1.228	2.457	0.913	1.825	4.984
240	5.659	22.538	1.124	2.249	1.040	2.080	6.024
270	5.262	23.878	1.040	2.080	1.228	2.457	7.253
300	4.930	24.649	0.971	1.942	1.544	3.088	8.796
330	4.648	25.561	0.913	1.825	2.231	4.483	11.028
360	4.404	26.424	0.863	1.725	10.242	20.484	21.270
390	4.191	27.243	0.819	1.638	3.089	6.193	24.369
420	4.003	28.024	0.781	1.562	1.806	3.612	26.175
450	3.836	28.772	0.747	1.495	1.363	2.725	27.538
480	3.686	29.489	0.717	1.434	1.124	2.248	28.662
510	3.550	30.078	0.690	1.380	0.971	1.942	29.633
540	3.427	30.544	0.665	1.330	0.863	1.725	30.489
570	3.314	31.086	0.643	1.285	0.781	1.562	31.276
600	3.211	32.108	0.622	1.244	0.717	1.434	31.993
630	3.116	32.711	0.603	1.206	0.665	1.330	32.659
660	3.027	33.297	0.586	1.171	0.622	1.244	33.291
690	2.945	33.866	0.569	1.139	0.586	1.171	33.866
720	2.868	34.421	0.554	1.108	0.554	1.108	34.421

Tormenta de diseño para T años

ESTACION COJATA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

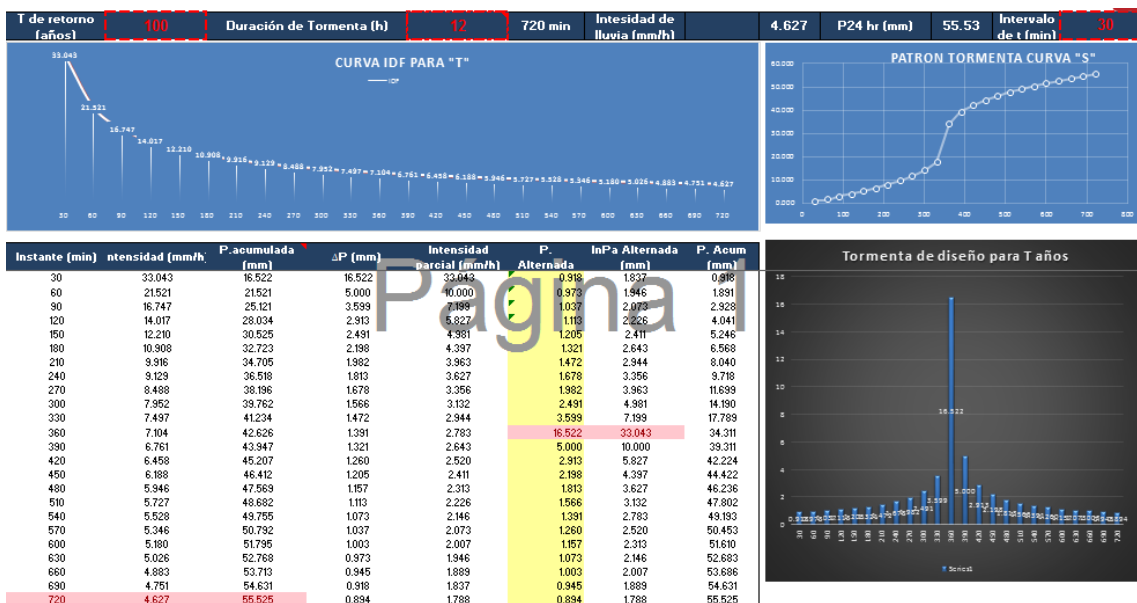
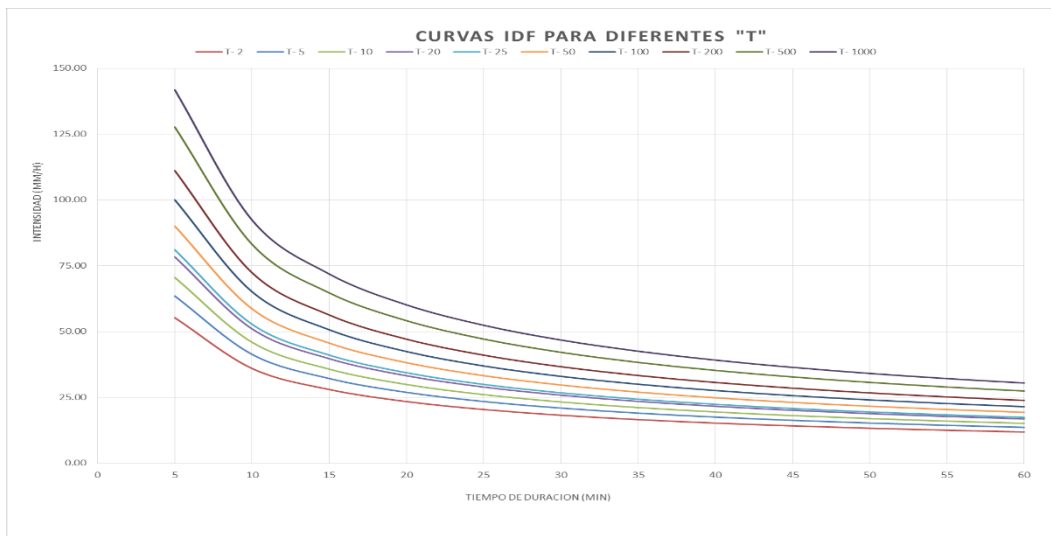
$$I = \frac{134.79238 \cdot T^{0.1515676}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

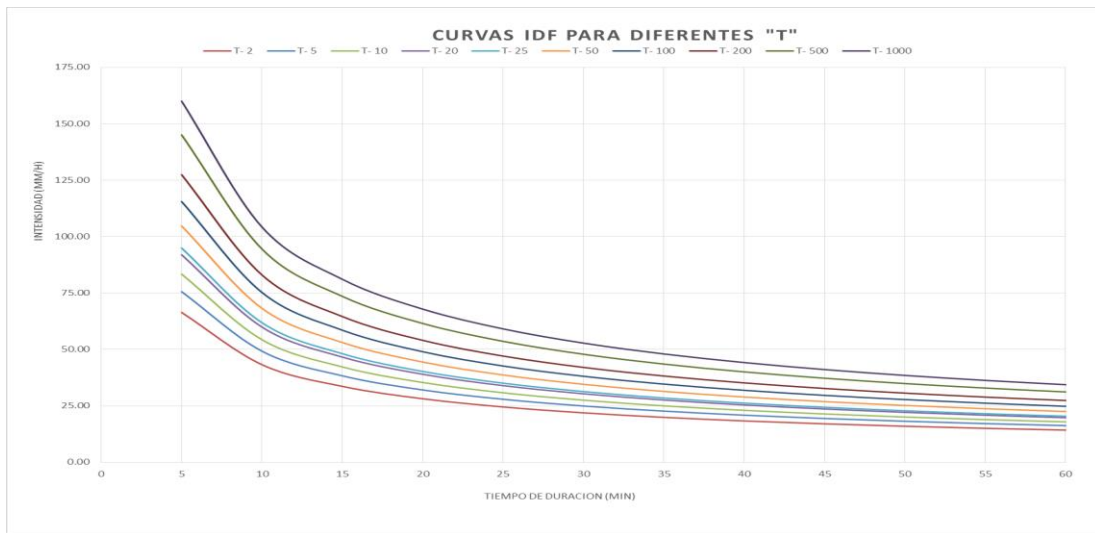
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	55.33	36.03	28.04	23.47	20.44	18.26	16.60	15.29	14.21	13.31	12.55	11.89
T-5	63.57	41.40	32.22	26.97	23.49	20.98	19.08	17.56	16.33	15.30	14.42	13.67
T-10	70.61	45.99	35.79	29.95	26.09	23.31	21.19	19.51	18.14	16.99	16.02	15.18
T-20	78.43	51.08	39.75	33.27	28.98	25.89	23.54	21.67	20.15	18.88	17.80	16.86
T-25	81.13	52.84	41.12	34.42	29.98	26.78	24.35	22.42	20.84	19.53	18.41	17.44
T-50	90.12	58.69	45.67	38.23	33.30	29.75	27.04	24.90	23.15	21.69	20.45	19.38
T-100	100.10	65.20	50.73	42.46	36.99	33.04	30.04	27.66	25.71	24.09	22.71	21.52
T-200	111.19	72.42	56.35	47.17	41.09	36.70	33.37	30.72	28.56	26.76	25.23	23.91
T-500	127.75	83.21	64.75	54.19	47.21	42.17	38.34	35.30	32.82	30.75	28.99	27.47
T-1000	141.91	92.42	71.92	60.20	52.44	46.84	42.58	39.21	36.45	34.15	32.20	30.51



ESTACION HUANCANÉ

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF												
$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$		$I = \frac{162.95953 \cdot T^{0.1415076}}{t^{0.618581}}$		Donde: I = intensidad de precipitación (mm/hr) T = Período de Retorno (años) t = Tiempo de duración de precipitación (min)								
Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración												
años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	66.42	43.26	33.66	28.18	24.54	21.93	19.93	18.35	17.06	15.99	15.07	14.28
T-5	75.62	49.25	38.32	32.08	27.94	24.96	22.69	20.89	19.42	18.20	17.16	16.26
T-10	83.41	54.33	42.27	35.38	30.82	27.53	25.03	23.05	21.43	20.07	18.92	17.93
T-20	92.01	59.92	46.63	39.03	34.00	30.37	27.61	25.42	23.63	22.14	20.88	19.78
T-25	94.96	61.85	48.13	40.28	35.09	31.35	28.49	26.24	24.39	22.85	21.54	20.42
T-50	104.74	68.22	53.09	44.43	38.70	34.58	31.43	28.94	26.91	25.21	23.77	22.52
T-100	115.54	75.25	58.56	49.01	42.69	38.14	34.67	31.92	29.68	27.81	26.21	24.84
T-200	127.45	83.01	64.59	54.06	47.09	42.07	38.24	35.21	32.74	30.67	28.92	27.40
T-500	145.09	94.50	73.54	61.55	53.61	47.89	43.54	40.09	37.27	34.92	32.92	31.19
T-1000	160.04	104.24	81.11	67.89	59.14	52.83	48.03	44.22	41.11	38.52	36.31	34.41



T de retorno (años)	100	Duración de Tormenta (h)	12	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	5.341	P24 hr (mm)	64.09	Intervalo de t (min)	30
CURVA IDF PARA "T"										
PATRON TORMENTA CURVA "S"										
Instante (min)	intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)	Tormenta de diseño para T años		
30	38.140	19.070	19.070	38.140	1.090	2.120	1.960			
60	24.941	24.941	5.771	11.542	1.123	2.246	2.183			
90	19.330	28.995	4.155	8.909	1.137	2.293	3.380			
120	16.179	32.358	3.363	6.725	1.284	2.663	4.664			
150	14.093	35.233	2.875	5.749	1.391	2.783	6.055			
180	12.990	37.770	2.537	5.075	1.525	3.050	7.581			
210	11.445	40.057	2.287	4.575	1.639	3.398	9.280			
240	10.538	42.150	2.093	4.186	1.937	3.874	11.217			
270	9.797	44.087	1.937	3.874	2.297	4.575	13.504			
300	9.179	45.895	1.808	3.616	2.875	5.749	16.378			
330	8.653	47.594	1.699	3.398	4.155	8.309	20.533			
360	8.200	49.200	1.606	3.212	19.070	38.140	39.603			
390	7.804	50.725	1.525	3.050	5.771	11.542	45.374			
420	7.454	52.180	1.454	2.909	3.363	6.725	48.737			
450	7.143	53.571	1.391	2.783	2.537	5.075	51.274			
480	6.863	54.906	1.335	2.670	2.093	4.186	53.367			
510	6.611	56.190	1.284	2.563	1.908	3.616	55.175			
540	6.381	57.429	1.238	2.477	1.806	3.212	56.791			
570	6.171	58.625	1.197	2.393	1.454	2.909	58.235			
600	5.978	59.784	1.158	2.317	1.335	2.670	59.570			
630	5.801	60.907	1.123	2.246	1.238	2.477	60.809			
660	5.636	61.997	1.090	2.181	1.158	2.317	61.967			
690	5.483	63.057	1.060	2.120	1.090	2.181	63.057			
720	5.341	64.089	1.032	2.064	1.032	2.064	64.089			

ESTACION MUÑANI

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

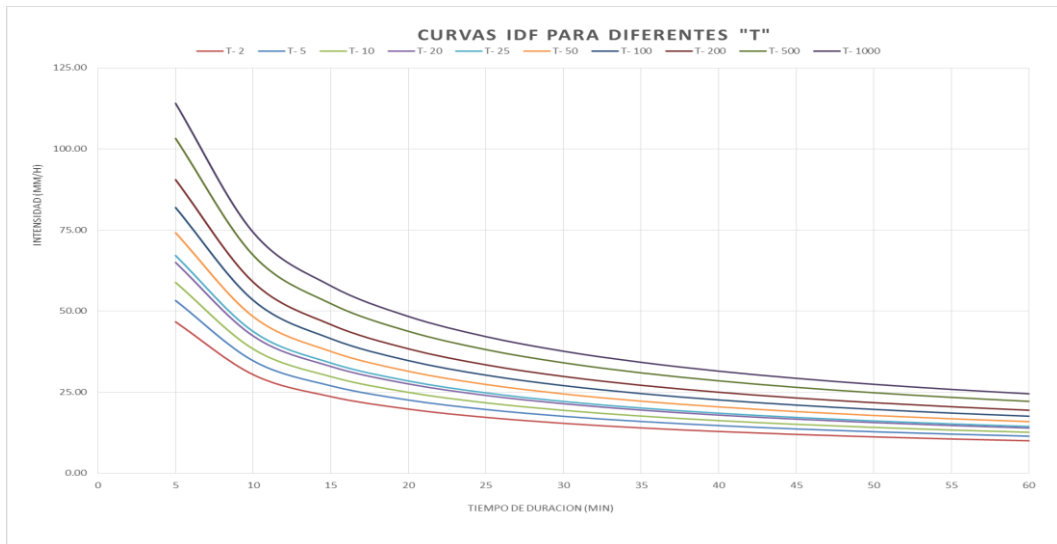
$$I = \frac{114.47528 \cdot T^{0.1436536}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

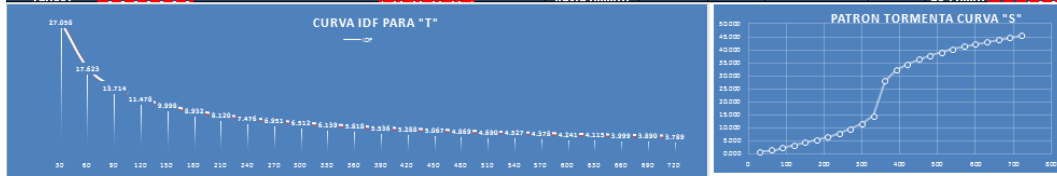
I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración
Duración en minutos

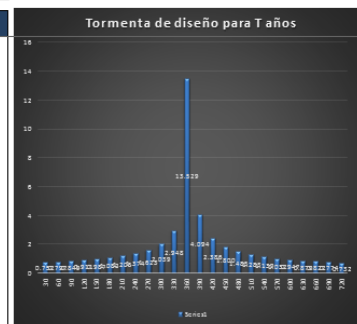
años	Duración en minutos											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	46.73	30.44	23.68	19.82	17.27	15.43	14.02	12.91	12.00	11.25	10.60	10.05
T-5	53.30	34.72	27.02	22.61	19.70	17.60	16.00	14.73	13.69	12.83	12.09	11.46
T-10	58.88	38.35	29.84	24.98	21.76	19.44	17.67	16.27	15.13	14.17	13.36	12.66
T-20	65.05	42.37	32.97	27.59	24.04	21.47	19.52	17.97	16.71	15.66	14.76	13.99
T-25	67.17	43.75	34.04	28.49	24.82	22.17	20.16	18.56	17.25	16.17	15.24	14.44
T-50	74.20	48.33	37.61	31.48	27.42	24.49	22.27	20.50	19.06	17.86	16.84	15.95
T-100	81.97	53.39	41.54	34.77	30.29	27.06	24.60	22.65	21.06	19.73	18.60	17.62
T-200	90.55	58.98	45.89	38.41	33.46	29.89	27.17	25.02	23.26	21.79	20.55	19.47
T-500	103.29	67.27	52.35	43.82	38.17	34.10	31.00	28.54	26.53	24.86	23.44	22.21
T-1000	114.10	74.32	57.83	48.40	42.16	37.67	34.24	31.53	29.31	27.46	25.89	24.53



T de retorno (años): **100** Duración de Tormenta (h): **12** 720 min Intensidad de lluvia (mm/h): **3.789** P24 hr (mm): **45.47** Intervalo de t (min): **30**



Instante (min)	Intensidad (mm/h)	P. acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	27.058	13.529	13.523	27.058	1.752	1.598	1.752
60	17.623	17.623	4.094	8.188	0.797	1.593	1.549
90	13.714	20.571	2.948	5.885	0.849	1.888	2.398
120	11.478	22.957	2.386	4.771	0.911	1.822	3.309
150	9.998	24.996	2.039	4.073	0.967	1.974	4.296
180	8.932	26.736	1.746	3.600	1.002	2.164	5.378
210	8.120	28.419	1.623	3.245	1.025	2.411	6.584
240	7.476	29.904	1.485	2.970	1.074	2.748	7.958
270	6.951	31.278	1.374	2.748	1.123	3.245	9.580
300	6.512	32.560	1.283	2.565	1.167	4.079	11.620
330	6.139	33.766	1.205	2.411	1.248	5.295	14.567
360	5.818	34.905	1.139	2.279	1.3529	27.058	28.096
390	5.536	35.987	1.082	2.164	4.094	8.188	32.191
420	5.288	37.019	1.032	2.063	2.386	4.771	34.576
450	5.067	38.006	0.987	1.974	1.800	3.600	36.376
480	4.869	38.953	0.947	1.894	1.485	2.370	37.851
510	4.690	39.864	0.911	1.822	1.253	2.865	38.144
540	4.527	40.743	0.879	1.757	1.139	2.279	40.283
570	4.378	41.592	0.849	1.698	1.032	2.063	41.315
600	4.241	42.414	0.822	1.643	0.947	1.894	42.262
630	4.115	43.210	0.797	1.593	0.879	1.757	43.141
660	3.999	43.984	0.774	1.547	0.822	1.643	43.963
690	3.890	44.736	0.752	1.504	0.774	1.547	44.736
720	3.789	45.468	0.732	1.464	0.732	1.464	45.468





ESTACION PROGRESO

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

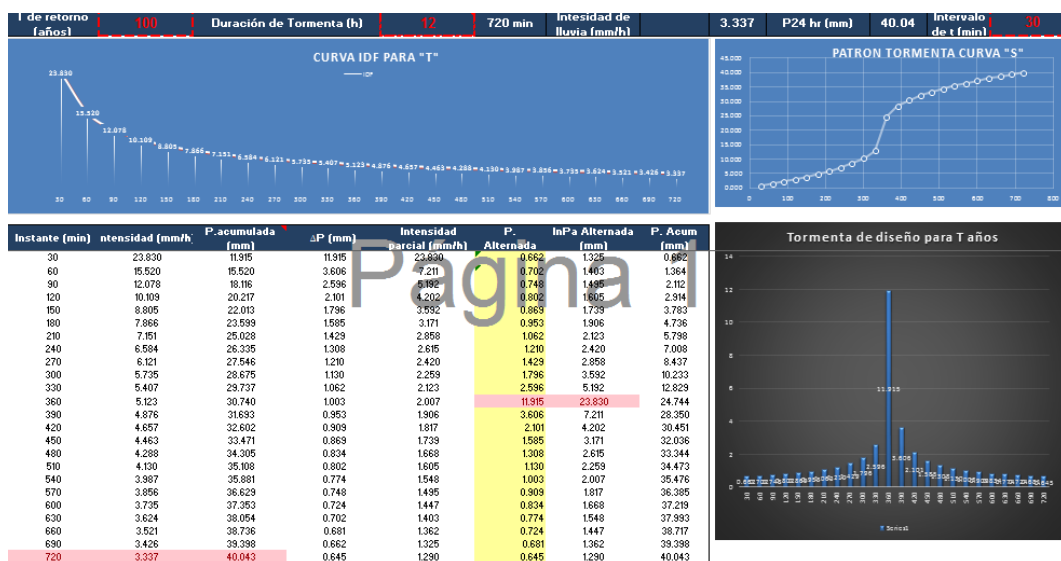
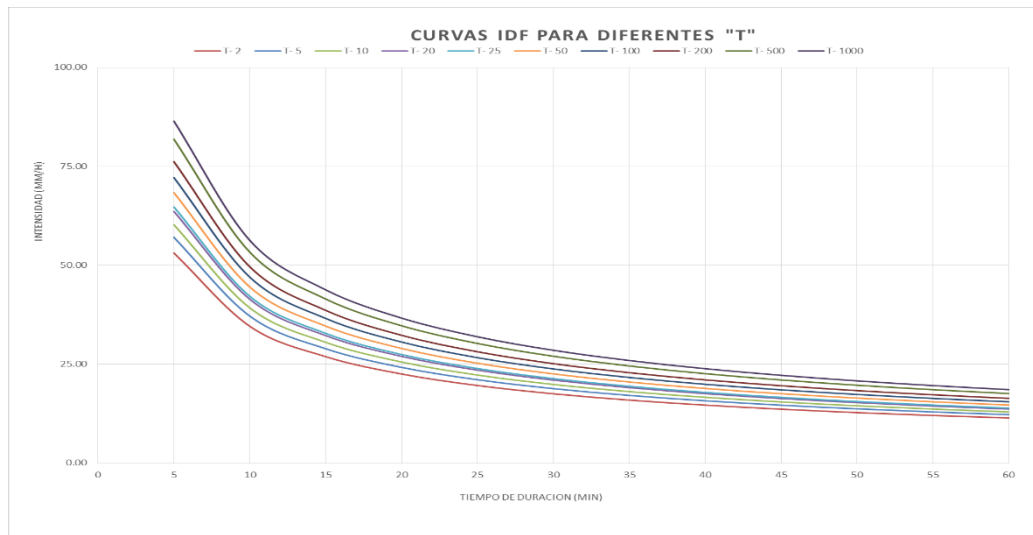
$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

$$I = \frac{136.19553 \cdot T^{0.0783360}}{0.618581 \cdot t}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

años T	Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración											
	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	53.13	34.61	28.93	22.54	19.63	17.54	15.94	14.68	13.65	12.79	12.06	11.42
T-5	57.09	37.18	28.93	24.22	21.09	18.85	17.13	15.77	14.66	13.74	12.95	12.27
T-10	60.27	39.26	30.55	25.57	22.27	19.90	18.09	16.65	15.48	14.51	13.68	12.96
T-20	63.64	41.45	32.25	27.00	23.51	21.01	19.10	17.58	16.35	15.32	14.44	13.68
T-25	64.76	42.18	32.82	27.47	23.93	21.38	19.43	17.89	16.64	15.59	14.69	13.92
T-50	68.37	44.53	34.65	29.00	25.26	22.57	20.52	18.89	17.56	16.46	15.51	14.70
T-100	72.19	47.02	36.59	30.62	26.67	23.83	21.66	19.94	18.54	17.37	16.38	15.52
T-200	76.22	49.64	38.63	32.33	28.16	25.16	22.87	21.06	19.58	18.34	17.29	16.39
T-500	81.89	53.33	41.50	34.74	30.26	27.03	24.57	22.62	21.04	19.71	18.58	17.61
T-1000	86.46	56.31	43.82	36.68	31.95	28.54	25.94	23.89	22.21	20.81	19.62	18.59





ESTACION PUTINA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA DE INTENSIDAD - CURVAS IDF

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

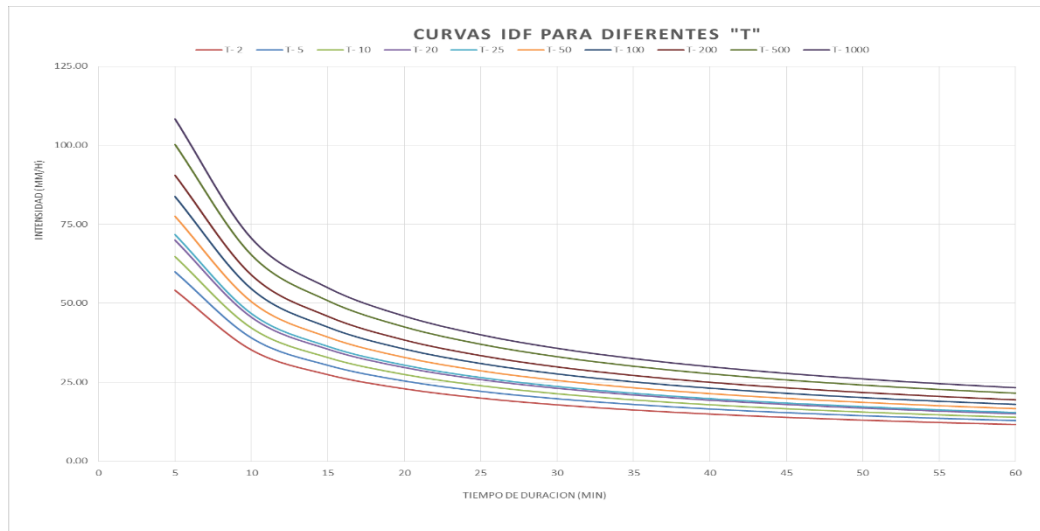
$$I = \frac{135.60786 \cdot T^{0.1116856}}{t^{0.618581}}$$

Donde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)
T = Período de Retorno (años)
t = Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro de intensidades para diferentes tiempos de duración

años T	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	54.14	35.26	27.44	22.97	20.01	17.87	16.25	14.96	13.91	13.03	12.28	11.64
T-5	59.98	39.06	30.40	25.44	22.16	19.80	18.00	16.57	15.41	14.43	13.61	12.89
T-10	64.80	42.21	32.84	27.49	23.95	21.39	19.45	17.90	16.65	15.60	14.70	13.93
T-20	70.02	45.60	35.49	29.70	25.87	23.11	21.01	19.35	17.99	16.85	15.89	15.05
T-25	71.79	46.76	36.38	30.45	26.53	23.70	21.54	19.83	18.44	17.28	16.29	15.43
T-50	77.56	50.52	39.31	32.90	28.66	25.60	23.28	21.43	19.92	18.67	17.60	16.68
T-100	83.81	54.59	42.48	35.55	30.97	27.67	25.15	23.16	21.53	20.17	19.02	18.02
T-200	90.55	58.98	45.90	38.41	33.46	29.89	27.17	25.02	23.26	21.79	20.55	19.47
T-500	100.31	65.33	50.84	42.55	37.07	33.11	30.10	27.72	25.77	24.14	22.76	21.57
T-1000	108.39	70.59	54.93	45.98	40.05	35.78	32.52	29.95	27.84	26.08	24.59	23.30



T de retorno (años)	Duración de Tormenta (h)	720 min	Intensidad de lluvia (mm/h)	3.874	P24 hr (mm)	46.49	Intervalo de t (min)	30
100	12	720 min	3.874	3.874	46.49	46.49	30	30

Instante (min)	intensidad (mm/h)	P.acumulada (mm)	ΔP (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	P. Alternada (mm)	InPa Alternada (mm)	P. Acum (mm)
30	27.665	13.833	13.833	27.665	0.765	1.538	0.768
60	18.019	18.019	4.186	8.272	0.819	1.929	1.584
90	14.022	21.032	3.014	6.009	0.868	1.798	2.452
120	11.736	23.472	2.439	4.578	0.932	1.863	3.383
150	10.223	25.557	2.085	4.170	1.003	2.018	4.382
180	9.132	27.397	1.840	3.681	1.106	2.213	5.499
210	8.302	29.056	1.659	3.318	1.232	2.455	6.731
240	7.644	30.575	1.516	3.036	1.405	2.810	8.126
270	7.107	31.980	1.405	2.810	1.653	3.318	9.795
300	6.658	33.291	1.311	2.623	2.085	4.170	11.880
330	6.277	34.523	1.232	2.465	3.014	6.027	14.894
360	5.948	35.688	1.165	2.330	4.186	8.372	20.727
390	5.661	36.795	1.106	2.215	4.806	11.294	32.913
420	5.407	37.850	1.055	2.110	5.439	14.878	46.490
450	5.181	38.859	1.009	2.018	6.081	19.999	61.571
480	4.978	39.827	0.968	1.937	6.836	26.835	79.407
510	4.795	40.759	0.932	1.863	7.699	35.434	100.000
540	4.629	41.657	0.899	1.797	8.668	45.802	123.568
570	4.478	42.525	0.868	1.736	9.741	58.043	150.000
600	4.337	43.365	0.840	1.680	10.918	72.161	180.000
630	4.208	44.180	0.815	1.629	12.199	88.160	210.000
660	4.088	44.971	0.791	1.582	13.584	106.044	240.000
690	3.977	45.740	0.769	1.539	15.073	125.817	270.000
720	3.874	46.488	0.749	1.497	16.666	147.483	300.000



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo CALIXTO CALATAYUD FLORES,
identificado con DNI 45353410 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Agrícola

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" Evaluación del efecto del cambio climático bajo escenarios del CMIP5 en el comportamiento de caudales máximos para la subcuenca del río Putina "

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 11 de Noviembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo CALIXO CALATAYUD FLORES,
identificado con DNI 45353410 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:

" EVALUACION DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO BAJO
ESCENARIOS DEL CMIP5 EN EL COMPORTAMIENTO DE
CAUDALES MAXIMOS PARA LA SUBCUENCA DEL RIO PUTINA"

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 11 de NOVIEMBRE del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella