

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“SIMULACIÓN A ESCALA DIARIA CON FINES DE EVALUACIÓN
DE LA VARIABILIDAD HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO
TAMBO”**

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

ANDRÉS JOAQUÍN JIMÉNEZ YANASUPO

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“SIMULACIÓN A ESCALA DIARIA CON FINES DE EVALUACIÓN
DE LA VARIABILIDAD HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO
TAMBO”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

ANDRÉS JOAQUÍN JIMÉNEZ YANASUPO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHAVARRI VELARDE
Presidente

Dr. GONZALO RAMCÉS FANO MIRANDA
Miembro

Mg. Sc. CAYO LEONIDAS RAMOS TAIPE
Miembro

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesor

LIMA – PERU

2021

DEDICATORIA

A mis padres Javier Jiménez y María Elena Yanasupo, por su amor incondicional, por ser los mejores padres que Dios me pudo haber dado, gracias por siempre creer y confiar en mí, esta meta es de ustedes.

A mis hermanos Jairo y Francisco por estar siempre presentes, por sus consejos, risas interminables y aliento en la consecución de esta tesis.

A mi abuelita Rafaela por su cariño de siempre, y a la memoria de mis abuelos Demetrio, Víctor y Paula, que ya no están presentes, pero sé que desde el cielo, guían y cuidan mis pasos.

Finalmente a mis tíos, primos y sobrinos, por los buenos momentos que se suelen pasar en familia.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme salud y permitirme cumplir una de mis metas.

A mi casa de estudios, la Universidad Nacional Agraria La Molina y a los docentes de la facultad de Ingeniería Agrícola, en especial a mi asesora de tesis, la Dra. Lía Ramos, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación de esta tesis.

A todos mis amigos y compañeros de aulas, que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

A todos los ingenieros y compañeros de trabajo con los que me toco compartir buenos momentos, recibir sus enseñanzas y experiencias profesionales.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. MODELOS HIDROLÓGICOS.....	3
2.1.1. Clasificación de los modelos.....	4
2.1.2. Calibración y validación de modelos	5
2.2. MODELO SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	7
2.2.1. Hidrología en SWAT	9
2.3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	12
2.4. ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL RÍO TAMBO.....	15
III. METODOLOGÍA	19
3.1. ZONA DE ESTUDIO	19
3.2. MATERIALES Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	20
3.2.1. Información geográfica	20
3.2.2. Información hidrometeorológica.....	20
3.2.3. Herramientas computacionales	21
3.3. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN CON SWAT.....	21
3.3.1. Análisis y control de calidad de datos meteorológicos	23
3.3.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico ...	29
3.3.3. Variabilidad climática e hidrológica	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	38
4.1.1. Análisis de sensibilidad, calibración y validación	40
4.1.2. Simulación de caudales	43
4.1.3. Disponibilidad hídrica.....	52
4.1.4. Balance hídrico de oferta y demanda	57
4.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO	59
4.2.1. Variabilidad climática	59
4.2.2. Variabilidad hidrológica en el río Tambo	67

4.2.3. Variabilidad hidrológica considerando la operación del embalse Pasto	
Grande a partir de 1989	69
V. CONCLUSIONES.....	73
VI. RECOMENDACIONES.....	75
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	76
VIII. ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los modelos hidrológicos.....	6
Tabla 2: Caudales medios mensuales derivados al río Tambo.....	16
Tabla 3: Datos del área de estudio.....	20
Tabla 4: Estaciones hidrometeorológicas disponibles.....	21
Tabla 5: Resumen de los resultados de la prueba de homogeneidad en el periodo 01/01/1972 – 31/12/2015	28
Tabla 6: Reclasificación del uso de suelo para el modelo.....	30
Tabla 7: Clasificación de suelos en el ámbito de estudio	30
Tabla 8: Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad.....	32
Tabla 9: Calificaciones generales de rendimiento para las estadísticas recomendadas	34
Tabla 10: Valores de referencia usados en el análisis de variabilidad climática con RClindex	35
Tabla 11: Descripción de los 27 índices usados por RClindex	36
Tabla 12: Resultado del análisis de sensibilidad del modelo	40
Tabla 13: Valores de los índices de rendimiento a escala diaria y mensual.....	42
Tabla 14: Resultado de los parámetros calibrados del modelo	42
Tabla 15: Balance hídrico del promedio anual en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015	43
Tabla 16: Balance hídrico mensualizado del promedio anual en la cuenca del río Tambo (hm ³)	45
Tabla 17: Estadísticos generales de caudales diarios de las subcuencas ubicadas en las zonas: alta, media y baja de la cuenca del río Tambo.....	49
Tabla 18: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales diarios de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015.....	54
Tabla 19: Balance hídrico de oferta y demanda	58
Tabla 20: Índices de temperatura (verde) y precipitación (azul) para el periodo 1976 – 2015, donde P_Value es el nivel de seguridad estadística para el análisis y la pendiente de la curva de ajuste que indica la magnitud del cambio por década	59
Tabla 21: Tendencias y magnitudes de cambio de los índices de temperatura de las estaciones Imata, Ubinas y Pampa Blanca para el periodo 1976 – 2015.....	64

Tabla 22: Resultados de los índices en la estación Santa Rosa de la cuenca en estudio. Periodo 1976 – 2015	67
Tabla 23: Caudales medios para los periodos 1976-1988 y 1989-2015.....	71
Tabla 24: Caudales al 75% de persistencia. Periodos 1976-1988 y 1989-2015.....	72
Tabla 25: Precipitación estación Crucero Alto (mm).....	86
Tabla 26: Precipitación estación Ichuña (mm).....	87
Tabla 27: Precipitación estación Imata (mm).....	88
Tabla 28: Precipitación estación La Joya (mm)	89
Tabla 29: Precipitación estación Laraqueri (mm)	90
Tabla 30: Precipitación estación Las Salinas (mm).....	91
Tabla 31: Precipitación estación Mazo Cruz (mm).....	92
Tabla 32: Precipitación estación Pampa Blanca (mm).....	93
Tabla 33: Precipitación estación Puno (mm).....	94
Tabla 34: Precipitación estación Quinistaquillas (mm).....	95
Tabla 35: Precipitación estación Ubinas (mm).....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes hidrológicos en SWAT	9
Figura 2: Movimiento del agua en SWAT	11
Figura 3: Probabilidad de excedencia de temperaturas y precipitaciones extremas.....	14
Figura 4: Efectos de los cambios en la distribución de las temperaturas en los extremos	15
Figura 5: Ubicación de la zona de estudio.....	19
Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente estudio	22
Figura 7: Variación de precipitación total diaria de las estaciones con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015	24
Figura 8: Diagrama de cajas (Box Plot) de la precipitación acumulada mensual de las estaciones con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015.....	25
Figura 9: Distribución de frecuencia relativa porcentual (%) de precipitación diaria con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015	26
Figura 10: Matriz de correlación de precipitación acumulada mensual de las estaciones disponibles	27
Figura 11: Análisis de curva de doble masa de los grupos 1 y 2 respectivamente.....	27
Figura 12: Modelo digital de elevación (panel izquierdo), pendientes generadas (panel derecho).....	29
Figura 13: Variación espacial del uso de suelo (panel izquierdo), tipo de suelo (panel derecho).....	31
Figura 14: Resultado de subcuencas delimitadas en la zona de estudio.....	38
Figura 15: Isoyetas en época húmeda (panel superior), y seca (panel inferior)	39
Figura 16: Resultado del análisis de sensibilidad del modelo	40
Figura 17: Resultado de la calibración del modelo a escala diaria (panel superior) y mensual (panel inferior). Caudal simulado (rojo) y caudal observado (azul).....	41
Figura 18: Resultado de la validación del modelo a escala diaria (arriba) y mensual (abajo). Caudal simulado (rojo) y caudal observado (azul)	42
Figura 19: Balance hídrico natural del promedio anual en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015.....	45
Figura 20: Distribución espacial de precipitación (PREC), evapotranspiración (ET), contribución de flujo base (GWQ) y contribución de escorrentía superficial	

(SURQ). En términos de promedios anuales para el periodo 1976-2015 a nivel de subcuencas.....	46
Figura 21: Evolución temporal promedio a escala diaria de los diferentes componentes del balance hídrico en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015	47
Figura 22: Ubicación de las subcuencas de análisis (subcuenca 11: zona alta, subcuenca 28: zona media, subcuenca 55: zona baja)	48
Figura 23: Evolución temporal del caudal simulado a escala diaria en las tres zonas de la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015	48
Figura 24: Evolución temporal del caudal simulado a escala mensual en las tres zonas de la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015	49
Figura 25: Caudales de salida promedio (m ³ /s) a nivel de subcuencas en los diferentes periodos de análisis	51
Figura 26: Niveles de persistencia de la oferta hídrica en la estación de aforo Santa Rosa.....	54
Figura 27: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales diarios de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015.....	55
Figura 28: Análisis de persistencia al 75% de caudales de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015	56
Figura 29: Punto de control para la determinación del balance hídrico	58
Figura 30: Balance hídrico de oferta y demanda en la cuenca del río Tambo periodo 1976 – 2015.....	58
Figura 31: Índices de temperatura estación Imata periodo 1976 – 2015 con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%	61
Figura 32: Índices de temperatura estación Ubinas, periodo 1976 – 2015, con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%	62
Figura 33: Índices de temperatura estación Pampa Blanca periodo 1976 – 2015 con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%	63
Figura 34: Curvas de densidad de probabilidad decanal de temperaturas máximas y mínimas diarias de la estación Imata (zona alta). Periodo 1976 – 2015.....	65
Figura 35: Curvas de densidad de probabilidad decanal de temperaturas máximas y mínimas diarias de las estaciones Ubinas (zona media) y Pampa Blanca (zona baja). Periodo 1976 – 2015	66

Figura 36: Índices adaptados de caudal simulado para la cuenca en estudio. Periodo 1976 – 2015.....	67
Figura 37: Curva de densidad de probabilidad decanal de caudal diario en la estación de control Santa Rosa. Periodo 1976 – 2015	68
Figura 38: Oferta hídrica a distintos niveles de persistencia antes de la puesta en marcha del PERPG. Período 1976-1988.....	70
Figura 39: Oferta hídrica a distintos niveles de persistencia después de la puesta en marcha del PERPG. Período 1989-2015.....	70
Figura 40: Comparación de caudales medios para los periodos 1976-1988 y 1989-2015	71
Figura 41: Comparación de caudales al 75% de persistencia para los periodos 1976-1988 y 1989-2015	72
Figura 42: Hidrogramas de la subcuencas 1 a la 11	81
Figura 43: Hidrogramas de la subcuencas 12 a la 22	82
Figura 44: Hidrogramas de la subcuencas 23 a la 33	83
Figura 45: Hidrogramas de la subcuencas 34 a la 44	84
Figura 46: Hidrogramas de la subcuencas 45 a la 55	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Plataforma ARCSWAT	80
Anexo 2: Plataforma de la Calibración Automática mediante SWATCUP	80
Anexo 3: Hidrogramas de caudales simulados a escala diaria en las 55 subcuencas de la zona de estudio.....	81
Anexo 4: Precipitación diaria de las estaciones utilizadas para este estudio.....	86

RESUMEN

El presente estudio plantea la simulación hidrológica a nivel diario en la cuenca del río Tambo, ubicado en el sur del Perú, a fin de conocer la disponibilidad hídrica en diferentes zonas de la cuenca y analizar su variabilidad a lo largo de cuatro décadas tanto en el aspecto hidrológico como en el climático. Para esto se utilizó como herramienta el modelo hidrológico SWAT, el cual depende de datos como tipo de suelo, cobertura vegetal, modelo digital de elevación, y por supuesto de datos climáticos.

El modelo se calibró y validó mediante los estadísticos Nash, PBIAS, RSR y R², obteniendo valores “buenos” y “satisfactorios” a escala diaria, además de “muy buenos” y “buenos” a escala mensual. Se lograron simular caudales en las 55 subcuencas delimitadas con ayuda del modelo, donde se eligieron tres de estas, ubicadas en las zonas alta, media y baja, para analizar la disponibilidad hídrica en cada una de ellas. Del balance hídrico general de la cuenca, los mayores valores con respecto a precipitación, evapotranspiración, flujo base y escorrentía superficial, se han producido en la zona alta, disminuyendo sus magnitudes al ir descendiendo sobre la misma. En cuanto a los caudales, se compararon los eventos más extremos entre décadas, y además se realizó el análisis de persistencia al 75% a través de las curvas de duración de caudales. La variabilidad climática se evaluó mediante los 27 índices climáticos recomendados por El Equipo de Expertos en Detección de Índices de Cambio Climático (ETCCDMI), en las zonas alta, media y baja, junto con la variabilidad hidrológica mediante dos índices adaptados para caudales. A través de las curvas de densidad de probabilidad, se encontraron variaciones significativas con respecto a las temperaturas, las cuales aumentan década a década, mas no en cuanto a precipitaciones; finalmente en cuanto a la variabilidad del caudal antes y después de la puesta en marcha del embalse Pasto Grande, los efectos se muestran en los caudales en la época de estiaje, los cuales han disminuido durante esta época del año para el periodo post embalse.

Palabras clave: Variabilidad hidrológica, disponibilidad hídrica, simulación, Tambo, SWAT.

ABSTRACT

This study proposes the hydrological simulation on a daily basis in the Tambo river basin, located in southern Peru, in order to know the water availability in different areas of the basin and analyze how it has varied over four decades in both the hydrological as well as the climatic aspect. For this, the SWAT hydrological model was used as a tool, which depends on data such as soil type, vegetation cover, digital elevation model, and of course on climatic data.

The model was calibrated and validated using the Nash, PBIAS, RSR and R2 statistics, obtaining "good" and "satisfactory" values on a daily scale, as well as "very good" and "good" on a monthly scale. Flows were simulated in the 55 sub-basins delimited with the help of the model, where three of these were chosen, located in the high, medium and low zones, to analyze the water availability in each of them. Of the general water balance of the basin, the highest values with respect to precipitation, evapotranspiration, base flow and surface runoff, have occurred in the upper zone, decreasing their magnitudes as they descend on it. Regarding the flows, the most extreme events between decades were compared, and the persistence analysis was also carried out at 75% through the flow duration curves. Climate variability was evaluated using the 27 climatic indices recommended by the Expert Team for the Detection of Climate Change Indices (ETCCDMI), in the high, medium and low zones, along with hydrological variability using two indices adapted for flows. Through the probability density curves, significant variations were found with respect to temperatures, which increase from decade to decade, but not in terms of precipitation; Finally, regarding the variability of the flow before and after the commissioning of the Pasto Grande reservoir, the effects are shown in the flows in the dry season, which have decreased during this time of the year for the post-reservoir period.

Key words: Hydrological variability, water availability, simulation, Tambo, SWAT.

I. INTRODUCCIÓN

La simulación hidrológica es un tema que con el tiempo ha avanzado de manera significativa debido a la cantidad de herramientas computacionales y a la disponibilidad de datos que provienen de los diferentes satélites y estaciones meteorológicas, aunque evidentemente las cuencas hidrográficas son sistemas muy complejos en cuanto a suelo, relieve y cobertura vegetal, estas herramientas nos permiten evaluar de manera satisfactoria estas grandes unidades hidrológicas y sus resultados nos garantizan información muy valiosa para el óptimo manejo de los recursos hídricos.

La principal función de los modelos hidrológicos es darnos a conocer el comportamiento de una cuenca y de los procesos que ocurren en ella durante el ciclo hidrológico, pero tal vez uno de los aspectos importantes que conlleva esto, sea la de modelar escenarios donde la información disponible es escasa, es decir, donde no exista una adecuada red de estaciones ya sean hidrológicas o meteorológicas y que en conjunto nos permitan dar un seguimiento óptimo de la disponibilidad hídrica.

A diferencia de los modelos hidrológicos agregados y/o agrupados los cuales asumen características homogéneas para la simulación, los modelos hidrológicos semi-distribuidos permiten simular las variaciones en los procesos físicos del ciclo hidrológico, debido a que mientras mayor sea la extensión territorial de la cuenca, es muy probable que las diferentes características del suelo en cuanto a tipo, uso y relieve varíen a lo largo y ancho de esta.

Es preciso entender que los modelos hidrológicos deben ser vistos como herramientas y no como un objetivo, y que para poder realizar una simulación óptima es necesario contar con una serie de datos.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la simulación a escala diaria con fines de evaluación de la variabilidad hidrológica en la cuenca del río Tambo ubicado en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Puno.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el análisis de sensibilidad, calibrar y validar los parámetros del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Tambo.
- Simular el caudal diario para el periodo 1976 – 2015 en las 55 subcuencas delimitadas del río Tambo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Según Fattorelli y Fernández (2011) los modelos permiten simular el comportamiento de un sistema real (prototipo) y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un determinado impulso o entradas al sistema. En hidrología e hidráulica se usan modelos: físicos, analógicos y matemáticos. Los modelos Físicos son una parte importante del diseño hidráulico (Por ejemplo los modelos de laboratorio de hidráulica). Los modelos Analógicos fueron muy usados para simular flujos subterráneos. Estos fueron desplazados por los modelos matemáticos de flujo subterráneo y de transporte de contaminantes como el modelo “Modflow” (USGS 2000). Los modelos matemáticos: son cualquier ecuación o algoritmo matemático que pretenda representar un fenómeno físico. Estos modelos son más versátiles que los anteriores y pueden fácilmente cambiar los valores de variables o parámetros. La dificultad de estos radica en que es generalmente necesario hacer simplificaciones del fenómeno físico real para lograr su representación matemática. El potencial de las computadoras y el hecho de tener cada día mejores datos en tiempo - espacio, hacen de los modelos matemáticos una herramienta más confiable que se acerca cada vez más al mundo real.

La disponibilidad de datos resulta fundamental en la selección del modelo a utilizar. Modelos simples dan resultados más confiables en áreas con poca información.

Las técnicas de análisis estadístico y regionalización resultan importantes para completar series, extrapolar datos en áreas homogéneas, realizar análisis de consistencia y corregir errores. Otra técnica que ha producido un verdadero cambio en el procesamiento y manejo de datos geográficos es el desarrollo de los “Sistemas de Información Geográfica” (SIG), facilitando la implementación, calibración, evaluación y comparación de modelaciones de cuencas.

2.1.1. Clasificación de los modelos

Oropeza (1999), citado en Urrutia (2016, p. 26), indican que los conceptos de modelos matemáticos en hidrología se describen de la siguiente manera:

- a. Modelos estocásticos: Los modelos estocásticos, se basan en los métodos y las técnicas estadísticas para hacer notar sus relaciones de entradas y salidas. El uso de estos modelos permite la exportación racional de la información disponible a corto y mediano plazo. Su uso es posible cuando se dispone de series suficientemente grandes de información. Los modelos estadísticos propiamente dichos se clasifican en modelos de regresión y corrección, en modelos probabilísticos y en modelos estocásticos. Los modelos probabilísticos utilizan la noción de análisis de frecuencia para analizar el comportamiento de un fenómeno hidrológico. La información utilizada para la calibración debe ser independiente del tiempo. Dado que la muestra disponible para caracterizar la población y/o el proceso físico hidrológico es generalmente limitada, en la extrapolación de resultados debe contemplarse un riesgo o error probable que el modelo debe cuantificar y considerar. En los modelos estocásticos, la información utilizada se trata como una serie de datos históricos y aleatorios en función del tiempo. Este tipo de modelos se utilizan frecuentemente para la predicción a corto y largo plazo de series hidrológicas.

- b. Modelos determinísticos: Los modelos determinísticos son formulados siguiendo formulas de la física y/o procesos químicos descriptivos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Implica una relación causa-efecto entre los valores de parámetros elegidos y los parámetros obtenidos de la aplicación de la ecuación. Idealmente un modelo determinístico debería proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. En la práctica sin embargo, la aplicación está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo de modelar, de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficientemente pequeños. Este tipo de modelo se utiliza cuando se dispone de poca información; caso frecuente de las obras de ingeniería rural e hidráulica, en los cuales se tiende a reconstruir indirectamente la evolución de los escurrimientos y flujos superficiales a partir del conocimiento de los eventos de lluvia diaria, de los cuales se dispone a menudo

de grandes series de datos. Los modelos determinísticos a su vez, se clasifican en modelos empíricos también llamados de caja negra, modelos conceptuales agregados y modelos distribuidos de base física.

- Los **modelos de caja negra** o caja gris se basan en una función de transferencia que realizan procesos hidrológicos sin considerar las leyes que rigen los fenómenos físicos implicados.
 - Los **modelos hidrológicos agregados** (MHA) son modelos conceptuales, es un esfuerzo de reproducir los procesos hidrológicos implicados en la transformación lluvia- escurrimiento, también se conocen como modelos que consideran la humedad del suelo. Constan, en general, de una parte de balance de agua, que calcula en el tiempo el balance entre lluvia, evaporación, escorrentía y almacenamiento; y una segunda parte de tránsito de los diferentes tipos de escorrentía. Por tanto, pueden modelar en continuo la respuesta de una cuenca a los eventos de precipitación.
 - Los **modelos hidrológicos distribuidos** (MHD) también llamados de base física, son modelos que dividen el área de captación en sub-áreas a las cuales se le asignan características particulares. Presentan el mayor grado de aproximación a las leyes físicas que rigen los principales procesos en la respuesta hidrológica de una cuenca, así como la variabilidad espacial de los principales factores que intervienen. Se basan exclusivamente en parámetros físicos, por tanto medibles, con lo cual son directamente aplicables a cuencas no aforadas.
- c. Modelos de sistemas: Se define como la habilidad de seccionar un número de alternativas posibles a partir de un conjunto particular de acciones y posibilidades para alcanzar ciertos objetivos, bajo condiciones y restricciones legales, éticas, económicas, políticas y sociales, así como las leyes que rigen el ambiente. Los tres componentes de los modelos de sistemas son: la teoría de la decisión, el análisis de sistemas y la investigación operacional.

2.1.2. Calibración y validación de modelos

Según Cabrera (2014), modelar una cuenca implica establecer una relación entre variables de entrada; esta relación implica introducir parámetros (con significado físico o no) que permitan simular lo mejor posible la variable de salida. Ya que estos parámetros son

inicialmente desconocidos, se requiere de un proceso de “calibración” para identificar sus valores. La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una “función objetivo”. Este proceso puede realizarse de dos formas:

- a. Prueba y error: Es el método más utilizado y usualmente recomendado. Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Tiene valor de aprendizaje pero es lento y subjetivo.
- b. Automática: Optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales. Algunos ejemplos son: técnicas de escalamiento (hill-climbing techniques), recocido simulado (simulated annealing), algoritmos genéticos, etc.

En la práctica, se sugiere aplicar el primer método para conseguir una primera aproximación y luego optimizarla utilizando una calibración automática.

Dependiendo del uso que se le quiera dar al modelo, éste puede requerir pasar por un proceso de “validación”. La validación tiene por objetivo determinar la bondad del modelo para realizar predicciones en un lugar específico para períodos fuera del período de calibración.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los modelos hidrológicos

Modelo	Institución	Ventajas	Desventajas
MIKE-BASIN / MIKE SHE	Danish Hydraulic Institute	Esta herramienta cuenta con un sistema modular en el que es posible sólo aplicar el módulo donde se aplica el modelo lluvia escurrimiento (MIKE11), es posible agregarle más módulos de acuerdo a los requerimientos.	La principal desventaja es el costo que asciende a miles de dólares dependiendo del módulo. Es un sistema cerrado, donde no se tienen opciones para desarrollar nuevos algoritmos.
HYDROTEL	L'Institut national de la recherche scientifique (INRS - ETE)	Es un modelo abierto que permite integrarle algoritmos desarrollados de manera externa. Tiene una capacidad alta de definición de micro- cuencas y no de malla como la mayoría de los MHD. El área de las microcuencas puede precisarse hasta 3 km ² . Su costo es reducido.	No tiene algoritmos suficientemente desarrollados para el funcionamiento de vasos. Se requiere de la preparación de una gran cantidad de archivos para la preparación de datos.

«continuación»

VIC	Washington University	Es un modelo de uso libre, tiene archivos de datos simplificados disponibles para la mayor parte de la República Mexicana. Está ligado a un modelo de pronóstico de lluvia tiempo real. Cuenta con un algoritmo de auto calibración.	La definición de la malla no tiene una precisión suficiente hasta 1/8 de grado (182.25 km ²)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool de USDA Agricultural Research Service y Soil and Water Research Laboratory, Tx. EUA	El modelo está constituido por una serie de sub-modelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. Tiene la capacidad para agregarle otro tipo de modelos como el MODFLOW. Es de uso libre.	Representa con mayor precisión el proceso físico, del flujo de agua, en cuencas pequeñas, no en cuencas de varios miles de kilómetros.
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System of Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers	El grado de discretización de la malla depende de la capacidad de cómputo que se tenga.	No se tiene suficiente precisión en los resultados en cuencas grandes, de varios miles de Km ² . Poca capacidad de acoplamiento con otros modelos.
WATFLOOD	Universidad of Waterloo (UWO)	Es un modelo capaz de acoplarse fácilmente con otros modelos como los modelos atmosféricos el MODFLOW. Es de uso libre.	Esta herramienta fue desarrollada principalmente para acoplarla a un modelo atmosférico y los principales problemas se dan en la comunicación de datos de estos dos modelos. Cuenta con una precisión en la definición de la malla de 15 km ² .
TOPMODEL	Lancaster University	El modelo requiere de pocos parámetros en la cuenca. El código del modelo está abierto para posibles modificaciones. Se ha aplicado en cuencas grandes de varios cientos de miles de kilómetros El modelo es de uso libre para fines académicos y de investigación	Presenta dificultades cuando se aplica en zonas con clima semi-árido o seco, con largos periodos de sequía. No es aplicable en cuencas excesivamente largas con pendiente moderada, la localización de zonas inundadas ocasiona muchas dificultades en la modelación.

FUENTE: Salgado (2012).

2.2. MODELO SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua) es una herramienta desarrollada por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas; su propósito es predecir el impacto que originan las prácticas del manejo del suelo en el recurso agua y en la generación de sedimentos en una cuenca hidrográfica. Es un modelo hidrológico semi-distribuido que requiere información específica

sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. son modelados directamente por SWAT (Uribe, 2013), para esta tesis, solo ha sido considerado el modelo hidrológico para la obtención de caudales.

El modelo SWAT, permite trazar las redes de drenaje y las subcuencas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y calcular el balance diario de agua a partir de datos meteorológicos, edafológicos y usos del suelo. Los procesos asociados al movimiento del agua son simulados por SWAT a partir de los datos de entrada. De esta manera el programa realiza una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas complejas a largo plazo.

Para conseguir estos objetivos el modelo (Galván, 2011):

- Tiene una base física.
- Usa los registros de entrada reales disponibles para la cuenca.
- Es eficiente a nivel computacional y realiza operaciones para grandes cuencas en un tiempo razonable.
- Es continuo en el tiempo y capaz de simular largos periodos.

La herramienta divide a la cuenca en varias subcuencas a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y de la exactitud del estudio; dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada, estando relacionadas con las vecinas. A su vez, las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que engloban áreas con los mismos tipos de suelo, de usos y coberturas y pendientes, y que por lo tanto tendrán una similar respuesta a la precipitación (Galván, 2011). Las HRU simplifican el proceso de cálculo ya que se consideran unidades homogéneas. Se supone que no hay interacción entre ellas en una misma subcuenca: la escorrentía, los sedimentos y los nutrientes transportados se calculan en cada HRU y se suman posteriormente para obtener los totales en la subcuenca (Pisani, 2008). La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para los distintos tipos de suelos y coberturas vegetales. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital del terreno para obtener el total en la cuenca; esto aporta una mayor precisión a la descripción

física del balance de agua (Galván, 2011).

2.2.1. Hidrología en SWAT

El modelo está basado en un balance hídrico (Figura 1) para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW_0 + \Sigma(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

dónde SW_t es el contenido final de agua en el suelo ($mm H_2O$), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i ($mm H_2O$), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i ($mm H_2O$), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i ($mm H_2O$), E_a es la cantidad de evapotranspiración en día i ($mm H_2O$), W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i ($mm H_2O$), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i ($mm H_2O$).

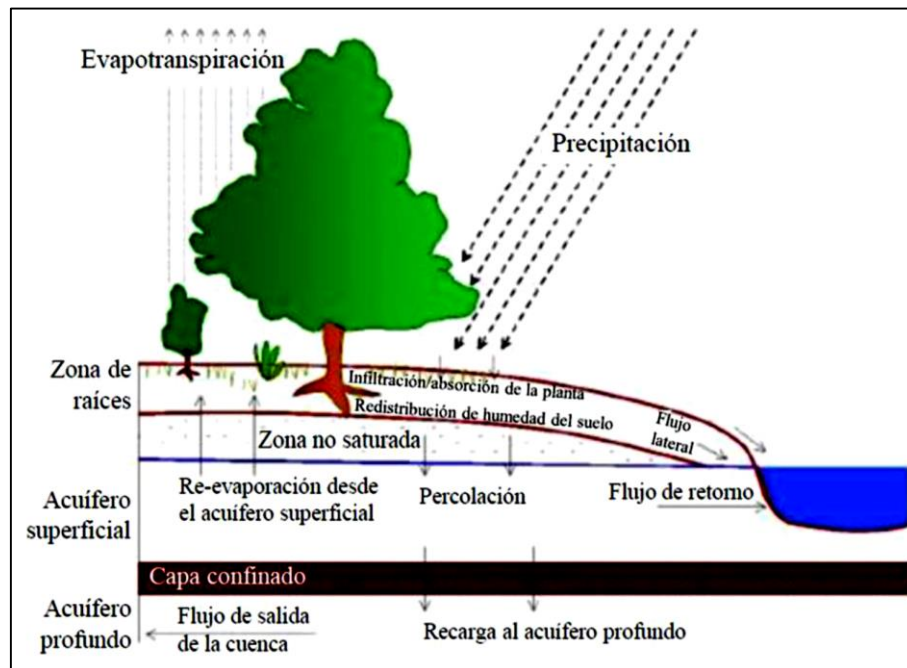


Figura 1: Componentes hidrológicos en SWAT

FUENTE: Fernández (2016)

En SWAT, el cálculo del balance de agua es simulada en dos componentes separados del ciclo hidrológico: la fase terrestre y la fase de enrutamiento. La fase terrestre controla las cargas de cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal en

cada subcuenca, mientras que la fase de enrutamiento define el movimiento del agua, sedimentos y nutrientes desde la red de canales hacia la salida de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011).

Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. Las conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 2.

La escorrentía superficial tiene lugar siempre que la intensidad de la precipitación que alcanza la superficie del suelo excede la tasa de infiltración. La infiltración disminuye cuando el suelo comienza a humedecerse y cuando el aporte de agua es mayor que la tasa de infiltración, entonces las depresiones superficiales se llenan. Si el aporte de agua continúa y las depresiones están llenas, comienza el movimiento del agua sobre la superficie del suelo o escorrentía superficial. SWAT dispone de dos métodos para calcular la escorrentía superficial: el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972) y el modelo de infiltración de Green y Ampt. En el presente estudio se empleará el método de curva número debido a que solo se cuenta con datos de precipitación a nivel diario (Neitsch *et al.*, 2005).

SWAT estima la evapotranspiración de referencia mediante los métodos de Hargreaves, Priestley Taylor, y Penman – Monteinth. El método de Penman requiere de la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento. Si los valores diarios de las variables anteriormente mencionadas no están disponibles pueden ser generados a partir de valores mensuales. Los métodos de Hargreaves y de Priestley Taylor dan resultados realistas en la mayoría de los casos. Los métodos calculan la evapotranspiración de suelos y de las plantas por separado.

El método a emplear en la simulación del presente estudio será el de Hargreaves, debido a que requiere de un menor número de insumos (temperaturas máximas y mínimas), ya que no se cuentan con datos de velocidad de viento, humedad y horas de sol. Este método fue derivado originalmente de ocho años de datos de lisímetro en California (Hargreaves, 1975). Varias mejoras se hicieron a la ecuación original (Hargreaves y Samani, 1982 y 1985) y la forma utilizada en SWAT fue publicado en 1985 (Hargreaves *et al.*, 1985; Neitsch *et al.*, 2005).

$$\lambda E_0 = 0.0023 * H_0 * (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} * (\bar{T}_{av} + 17.8)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹), E_0 es la evapotranspiración potencial (mm d⁻¹), H_0 es la radiación extraterrestre (MJ m⁻² d⁻¹), T_{mx} es la temperatura máxima del aire para un día (°C), T_{mn} es la temperatura mínima del aire para un día (°C), y \bar{T}_{av} es la temperatura por día (°C).

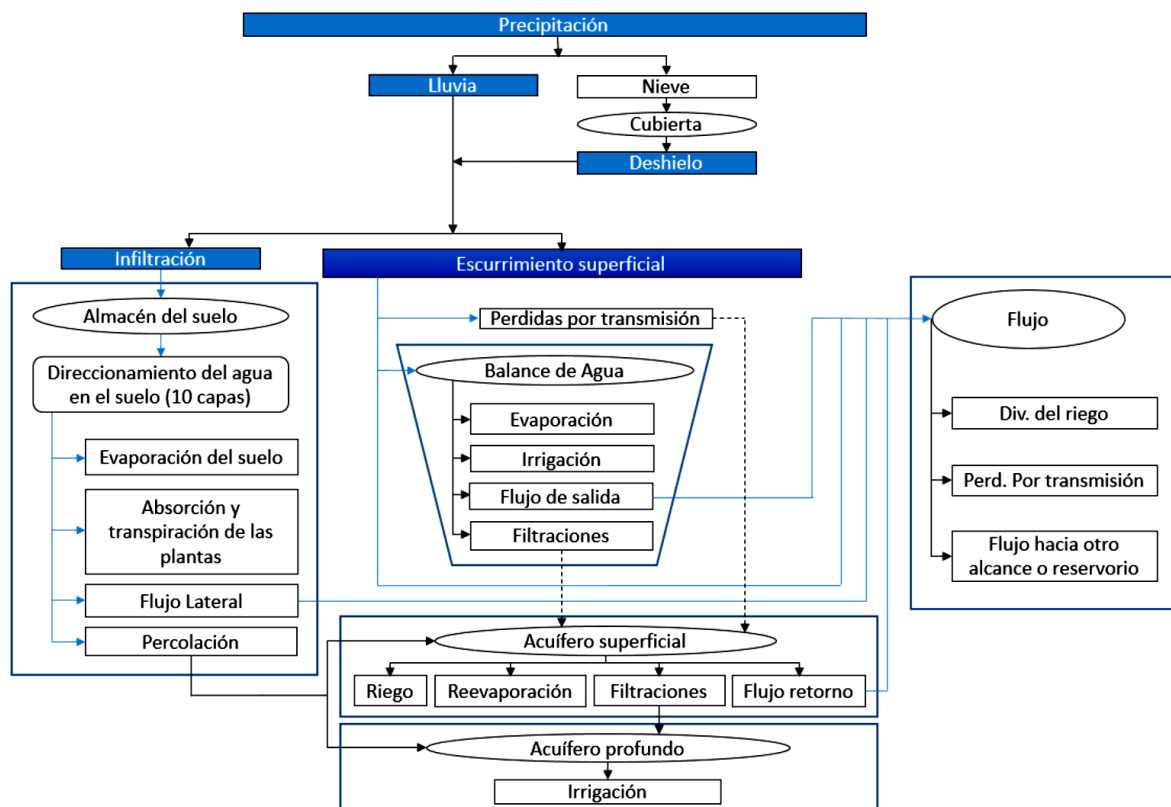


Figura 2: Movimiento del agua en SWAT

FUENTE: Neitsch (2011)

2.3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define a la variabilidad climática como la fluctuación recurrente en el clima normal en escalas temporales y sus causas son generalmente de origen natural. La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio del clima. Se clasifican en: periódicas, cuasi-periódicas y aperiódicas. Las variaciones periódicas son aquellas que se presentan en ciclos conocidos, como las temporadas de lluvia, temporadas de bajas temperaturas, etc. Las variaciones cuasi-periódica son aquellas de ciclos recurrentes pero menos predecibles, por ejemplo El Fenómeno del Niño, ya que es un fenómeno recurrente pero no periódico, aparece en promedio cada cuatro años, sin embargo puede ocurrir cada dos años. Las variaciones aperiódicas son aquellas que se dan de forma esporádica o repentina, que pueden afectar el sistema climático, por ejemplo los ciclones tropicales extremos. En las décadas recientes el estudio de los desastres se ha vinculado con los elementos de la variabilidad climática a diferentes escalas espaciales y temporales (Canal smnmexico, 2011, 0m, 40s).

Frecuentemente se suele confundir los términos “Cambio climático” y “Variabilidad climática”, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático define al cambio climático como un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición mundial de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables, se puede decir entonces, que el cambio climático se atribuye a las actividades humanas, mientras que la variabilidad climática se atribuye a causas naturales. (Canal smnmexico, 2011, 4m, 02s)

La temperatura es uno de los parámetros meteorológicos más importantes. Ejerce influencia, en escalas de tiempo cortas y largas, sobre la manera en que los organismos, incluidos los humanos, se comportan e interactúan con el medio ambiente. La temperatura superficial es primordialmente controlada por radiación solar, pero la nubosidad, el albedo de la superficie, la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, así como características topográficas locales, afectan la temperatura a una escala espacial local.

Los grandes cuerpos de agua también afectan la temperatura local ya que estos actúan como reservorio de energía. Por ejemplo, la temperatura alrededor de lagos u océanos típicamente experimentan menor variabilidad que la que se observa en localidades tierra adentro. La razón está vinculada a la mayor capacidad calorífica del agua que le permite almacenar

energía cuando la temperatura superficial es alta (como ocurre durante el día, o también, a una escala de tiempo mayor durante el verano) y liberar calor cuando los alrededores se encuentran más fríos como ocurre en la noche o en invierno.

Las temperaturas máxima y mínima diarias se miden típicamente debido a su impacto en diferentes áreas de la actividad humana como la agricultura así como en términos del confort humano. Debido a que la temperatura más alta en un periodo de 24 horas sucede típicamente durante la tarde, la temperatura máxima está asociada a las temperaturas diurnas. Por el contrario, dado que la temperatura mínima ocurre justo antes o cerca de la salida del sol, este parámetro está asociado con temperaturas nocturnas. Tanto la temperatura mínima como la máxima son en general el resultado del balance energético, mayoritariamente entre la radiación de onda corta (solar) y la radiación de onda larga (térmica) aunque otros procesos, como la convección y la advección, juegan un rol para establecer tanto la temperatura mínima como la máxima.

La temperatura máxima depende fuertemente de la radiación solar que llega a la superficie y por tanto depende de la cobertura nubosa y de las partículas suspendidas en el aire que modulan el ingreso de energía. Esto es especialmente importante en la región tropical en la que el ángulo de elevación solar es alto a lo largo del año originando una variabilidad relativamente pequeña en términos de disponibilidad de energía y cambios en la duración del día. Por otro lado, la temperatura mínima diaria es más influenciada por características topográficas como la elevación de la superficie, pero también por la nubosidad ya que las nubes absorben y reemiten radiación infrarroja, desde y hacia la superficie que también influye el valor de la temperatura.

Los eventos meteorológicos o climáticos con valores estadísticos atípicos a menudo provocan desastres y daños. Típicamente, estos eventos se encuentran dentro de las colas de las distribuciones estadísticas que describe el comportamiento de las condiciones meteorológicas. En la Figura 3, se muestra un esquema de los eventos extremos que siguen esta definición para precipitación y temperatura (Andrade, 2018).

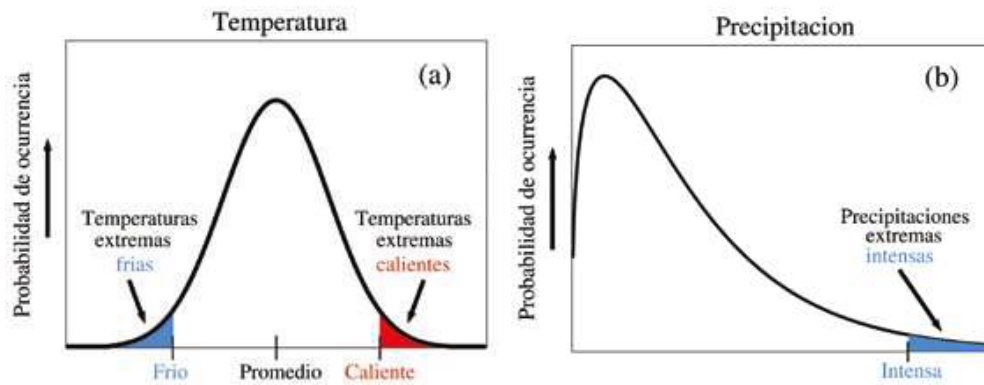


Figura 3: Probabilidad de excedencia de temperaturas y precipitaciones extremas

FUENTE: Andrade (2018)

Los impactos de los eventos extremos dependen de la magnitud del evento y de su duración. Cuanto más tiempo prevalezca, más dañino es. Por ejemplo, los eventos extremos de precipitación, incluso los cortos, pueden producir inundaciones, deslizamientos de tierra y otros eventos que ponen en riesgo la vida. Estos son típicamente eventos extremos de tiempo. Las sequías, por otro lado, son eventos de larga duración y se clasifican como eventos climáticos extremos (Andrade, 2018).

Un clima cambiante produce cambios en la frecuencia, la intensidad, la extensión espacial, la duración y las circunstancias temporales de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y puede dar lugar a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos sin precedentes. Los cambios en los fenómenos climáticos extremos pueden estar relacionados con cambios en la media, la varianza, o la forma de distribución de la probabilidad, o en todas ellas (Ver Figura 4). Algunos fenómenos climáticos extremos (por ejemplo, las sequías) pueden ser el resultado de una acumulación de fenómenos meteorológicos o climáticos que no son extremos, si se consideran por separado. Muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos son el resultado de la variabilidad natural del clima. La variabilidad natural seguirá siendo un factor determinante de los fenómenos climáticos extremos en el futuro, además de los efectos de los cambios antropógenos del clima (IPCC, 2012).

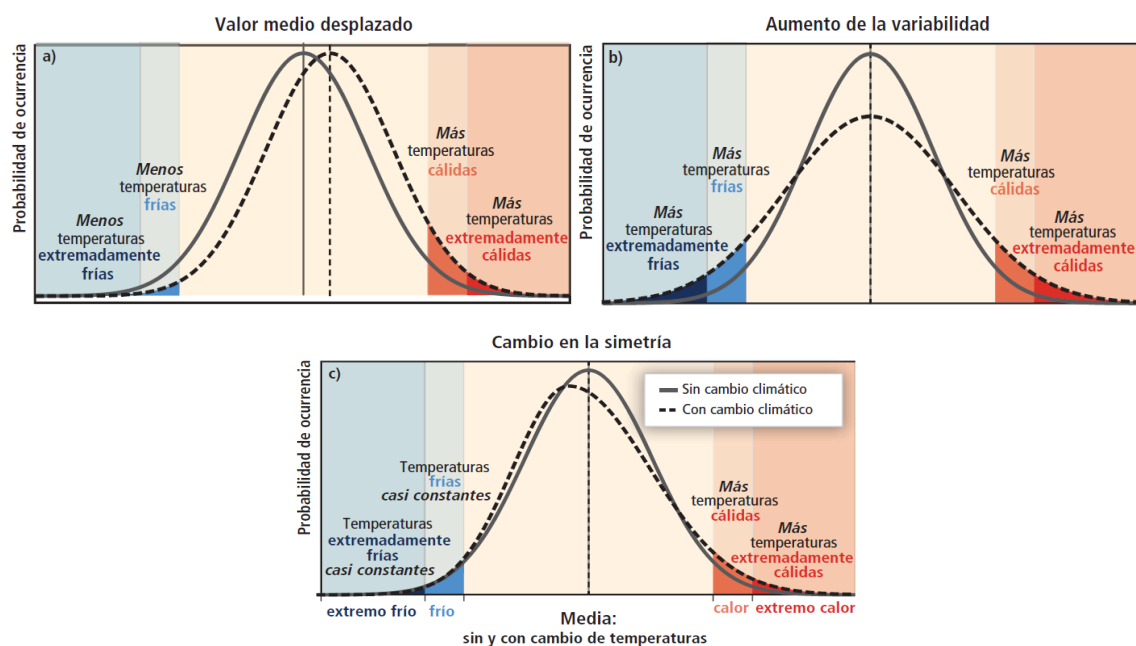


Figura 4: Efectos de los cambios en la distribución de las temperaturas en los extremos

FUENTE: IPCC (2012)

2.4. ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

El Proyecto Especial Pasto Grande fue creado para resolver el problema de déficit de agua en el departamento de Moquegua y la falta de energía en el sur del país, bajo una concepción de proyecto de propósitos múltiples: mejoramiento del riego en los valles de Torata, Moquegua e Ilo, ampliación de la frontera agrícola, abastecimiento de agua potable a las ciudades e industrias de la zona e incremento de la oferta de energía eléctrica.

Para alcanzar tal objetivo, como parte del PEPG se planteó el aprovechamiento de las aguas de la cuenca del río Tambo (sub cuencas Vizcachas y microcuencas Chincune y Chilota), y de la cuenca del río Moquegua (sub cuencas Torata, Tumilaca y Huancarane).

Según el “Balance Hidrológico en los Valles de Tambo, Moquegua e Ilo”, realizado por el Instituto Nacional de Desarrollo - INADE, en el año 2001, concluye que como consecuencia de la Construcción y Operación del Embalse Pasto Grande entre los años 1989 a 1999, se produjo la reducción de la Disponibilidad Hídrica del Valle de Tambo en los meses de estiaje (setiembre a diciembre), recomendándose que el Embalse Pasto Grande abastezca al Valle de Tambo con un Volumen total de agua de 8.2 hectómetros cúbicos no acumulable año a

año, con lo cual también se lograría mejorar la calidad del agua. En la práctica, después de casi 30 años de funcionamiento del embalse, los resultados de las evaluaciones preliminares respecto al uso proveniente del PEPG, no responde en su totalidad a los objetivos propuestos en los planteamientos hidráulicos iniciales del proyecto:

- i. En la región de Moquegua no se está irrigando toda la superficie prevista (por falta de desarrollo de la infraestructura de riego necesaria) y la eficiencia de riego ha disminuido agravando los problemas de drenaje.
- ii. Por lo indicado en (i), un tercio del agua que ingresa al reservorio se utiliza para riego de las tierras de Moquegua, un segundo tercio se pierde por evaporación y el tercer tercio permanece almacenado sin uso alguno.
- iii. En la cuenca del río Tambo, la cantidad y calidad del agua que llega al valle agrícola ha disminuido, constituyéndose en un problema significativamente grave en los “años secos”.

Por lo tanto la construcción de la primera etapa del Proyecto Pasto Grande generó conflicto social por extracción de recurso hídrico de la cuenca alta del Tambo mediante el trasvase hacia la cuenca vecina del río Moquegua y afectación sobre la calidad del agua superficial en la cuenca del Tambo, especialmente grave en periodos de estiaje. Por lo que a partir de 1989, se generó un problema social entre los usuarios de agua de los valles de Moquegua y Tambo, que aún en la actualidad, sigue existiendo por no cumplirse los objetivos iniciales (Marroquín, 2016).

La información de las descargas diarias por parte de la presa hacia el río Tambo, específicamente entre los meses de octubre a diciembre, se muestran a continuación en la Tabla 2. Dicha información ha sido adquirida de la base de datos de la ANA a través de su página web, para cada año disponible:

Tabla 2: Caudales medios mensuales derivados al río Tambo

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.35	0.04
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	1.22
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.80
2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	2.35

«continuación»

2006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	2.43
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	1.44
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	1.28
2009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.34	0.31
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.78	0.58
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.90	0.90
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	1.38
2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.99	0.59
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	1.35

FUENTE: Autoridad Nacional del Agua (ANA). Visor de estaciones (2018).

Así mismo, se han desarrollado los siguientes estudios empleando modelos hidrológicos en el ámbito de la cuenca del río Tambo:

- En el año 2013, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), los Gobiernos Regionales de Arequipa y Moquegua, junto con la empresa consultora Asesores Técnicos Asociados S.A, elaboraron el estudio hidrológico para la determinación del potencial hídrico de las cuencas de los ríos Tambo y Moquegua, mediante la elaboración de un modelo de soporte de decisiones con la aplicación del software WEAP.
- En el año 2016 Coloma y Ramos, presentaron en el XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, la simulación hidrológica e hidráulica del río Tambo con fines de prevención de inundaciones, en el Sector de Riego Santa Rosa Ventillata Ayanquera, en el Distrito de Cocachacra, Arequipa, y conocer los caudales de máximas avenidas y los niveles de inundación considerando flujos con régimen permanente, para los periodos de retorno de 100, 500, 1000 y 1500 años; donde hicieron uso de las herramienta HEC HMS para la modelación hidrológica.

A continuación se presentan antecedentes de estudios desarrollados en el Perú mediante el modelo hidrológico SWAT, el cual ha sido empleado en el presente estudio.

- López (2012) realizó la calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca. El proyecto de investigación se desarrolló con el propósito de investigar el efecto de la actividad minera y su aportación de metales pesados en los diferentes distritos hidrográficos.
- En el año 2013 el Ministerio del Ambiente (MINAM), a través de la Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural del Viceministerio

de Desarrollo Estratégico de los Recursos naturales; con apoyo del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Programa del CGIAR “Challenge Program on Water and Food” dieron a conocer a funcionarios de la ANA las experiencias de la aplicación y funcionamiento del modelo hidrológico SWAT, así como los principales resultados de modelación obtenidos en la cuenca del río Cañete. Los asistentes destacaron la importancia del SWAT como una herramienta que permite priorizar las zonas de mayor producción de agua a lo largo de toda la cuenca. Asimismo, se resaltó la relevancia del proceso de calibración y la trascendencia de contar con información de buena calidad en los procesos de modelación.

- Díaz (2014) evaluó el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica en la cuenca alta y media del río Jequetepeque mediante la aplicación de modelo hidrológico SWAT y el modelo climático regional PRECIS.
- Martínez (2014) aplicó el modelo hidrológico SWAT y los modelos de circulación general (MCG) CMIP3, MRI 3.1 y MRI 3.2 en la cuenca del río Ica con el fin de caracterizar y evaluar el impacto del cambio climático en la oferta de agua para fines del siglo XXI.
- Valladares (2017) evaluó la respuesta hidrológica ante el impacto del cambio climático en la cuenca del río Santa para el periodo (2050 - 2059) donde hizo uso del modelo hidrológico SWAT para la obtención de la escorrentía superficial y sedimentos en suspensión; además utilizó ocho modelos de circulación general los cuales fueron sometidos a una reducción de escala de tipo estadística y proyectada al periodo de interés (2050 - 2059).
- León (2019) aplicó el modelo hidrológico SWAT y modelos climáticos globales para investigar el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca media y alta del río Piura a mediados del siglo XXI.

III. METODOLOGÍA

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Tambo, comprende a las provincias de Sánchez Cerro y Mariscal Nieto en el departamento de Moquegua; provincias de Arequipa e Islay en el departamento de Arequipa y provincias de Puno y San Román en el departamento de Puno; tiene un área total de 13,361 km², de las cuales 8 149 km² corresponden a la cuenca húmeda, ubicada por encima de los 2 500 m.s.n.m. (Ver Figura 5).

La cuenca del río Tambo limita por el norte con las cuencas de los ríos Chili, Vitor, Quilca y Coata; por el sur limita con las cuencas de los ríos Moquegua y Locumba; por el oeste con el Océano Pacífico y por el este limita con las cuencas de los ríos Ilave e Ilpa.

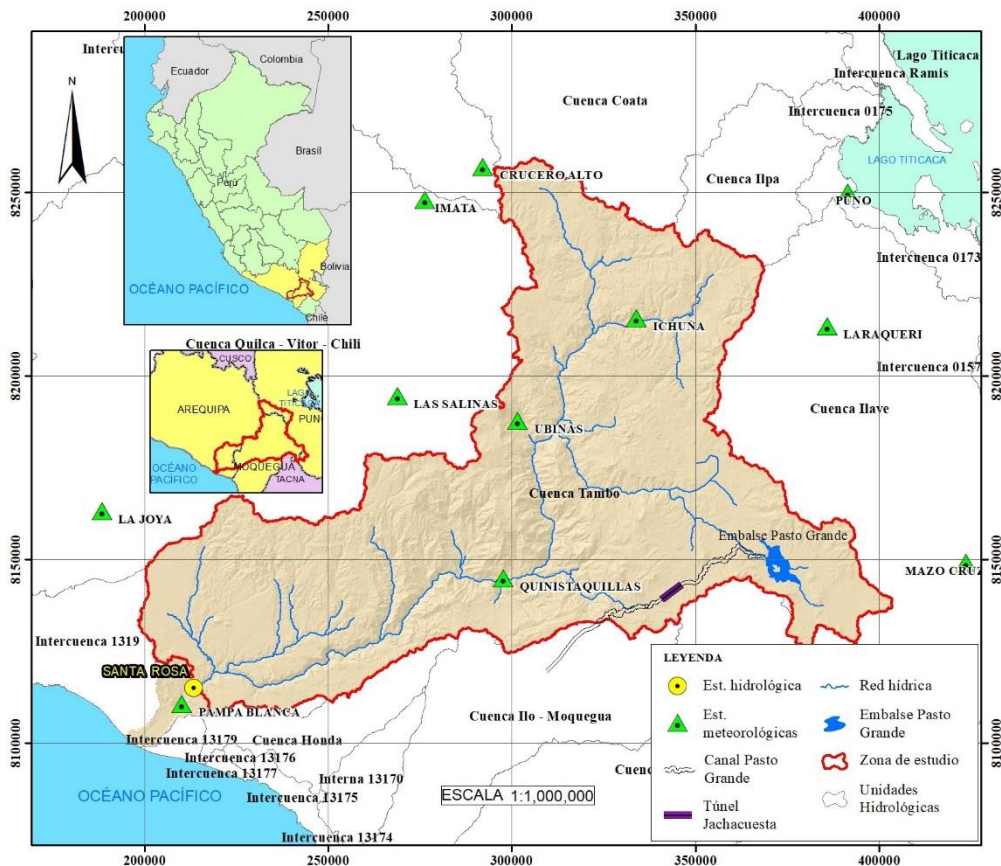


Figura 5: Ubicación de la zona de estudio

La red hidrográfica de la cuenca del río Tambo, tiene como cauce principal al río Tambo, el cual se forma, sobre los 3 600 m.s.n.m., por la confluencia de los ríos: Carumas, Coralaque, Ichuña y Paltiture y se desplaza de noreste a suroeste.

3.2. MATERIALES Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

3.2.1. Información geográfica

Los datos básicos requeridos por el modelo hidrológico SWAT para representar la distribución físico-química de la cuenca en estudio son los siguientes:

Tabla 3: Datos del área de estudio

Tipo de Dato	Resolución	Fuente
Datos hidrometeorológicos	Diaria	SENAMHI, ANA
Topografía (DEM)	30 m	ASTER/GDEM (NASA)
Cobertura vegetal	30 m	GlobeLand30, 2012
Mapa de suelo	1:5000000	FAO-1995, 2003
Pendientes	30 m	SWAT

3.2.2. Información hidrometeorológica

El modelo hidrológico SWAT requiere que la data de entrada de precipitación, así como temperatura máxima y mínima sea a escala diaria, dicha data fue obtenida de instituciones como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la Junta de Usuarios del río Tambo. En la Tabla 4, se muestran las estaciones seleccionadas en el presente estudio, se detalla también su categoría y localización (ver Figura 5). Dichas estaciones meteorológicas fueron seleccionadas por contar con más del 95% de disponibilidad de datos a escala diaria, por lo que estaciones cercanas que no cumplieran con ese porcentaje fueron descartadas. Para la información hidrológica se optó por la estación Santa Rosa ubicada en la parte baja de la cuenca como único punto de control, debido a que cuenta con el 96% del total de registros diarios en un periodo de veinte años. Toda la información obtenida de dichas estaciones, ha sido evaluada mediante un análisis exploratorio de datos, a través del análisis visual y estadístico.

Tabla 4: Estaciones hidrometeorológicas disponibles

Nombre	Tipo	Cuenca	Latitud	Longitud	Altitud
Crucero Alto	Pp, T°	Camaná	-15.75744167	-70.93963889	4470
Ichuña	Pp, T°	Tambo	-16.13261111	-70.55208333	3800
Imata	Pp, T°	Vitor-Chili	-15.83638889	-71.0875	4519
Laraqueri	Pp, T°	Ilave	-16.15469444	-70.06658333	3900
Las Salinas	Pp, T°	Vitor-Chili	-16.31777778	-71.16288056	4310
Mazo Cruz	Pp, T°	Ilave	-16.739	-69.71547222	4003
Puno	Pp, T°	Ilave	-15.82625	-70.01208333	3820
La Joya	Pp, T°	Vitor-Chili	-16.59222222	-71.91888889	1292
Pampa Blanca	Pp, T°	Tambo	-17.06833333	-71.7225	100
Ubinas	Pp, T°	Tambo	-16.3822222	-70.8563888	3370
Quinistaquillas	Pp, T°	Tambo	-16.76905556	-70.89705556	1765
Santa Rosa	Hidrométrica	Tambo	-17.029285	-71.69144	160

3.2.3. Herramientas computacionales

Para la modelación hidrológica se utilizó el modelo semi-distribuido SWAT (ArcSwat) en su versión 2012, conjuntamente con el programa ArcGis 10.1. El tratamiento de la información meteorológica se realizó con Microsoft Excel 2013 y RStudio 3.5.2, tanto para la data de entrada como la de salida. Los análisis de sensibilidad y calibración fueron realizados con el programa SWATCUP 2012. Finalmente para el análisis de variabilidad climática e hidrológica se utilizó RClimdex, paquete perteneciente al programa R 3.5.2.

3.3. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN CON SWAT

El primer paso en toda simulación es el análisis y control de calidad de la data hidrometeorológica, este paso previo no es abordado por la herramienta SWAT, por lo que dependerá del modelador la calidad de los datos que sean ingresados al modelo. Una vez concluida la fase de evaluación y análisis exploratorio de datos, la aplicación del modelo se llevó a cabo con la interface que se desarrolló entre el SWAT y los SIG, llamada ArcSWAT, la cual fue desarrollada por Di Luzio *et al.*, (2002), esta interface subdivide automáticamente la cuenca en subcuencas a partir del DEM, posteriormente los datos de entrada son extraídos a partir de planos de información y del banco de datos relacionados para cada subcuenca (Castañeda, 2016), además del modelo digital de elevación (DEM), el modelo se alimenta de un mapa de suelos con sus respectivas características y el mapa de cobertura o uso de suelo. La interrelación de estos datos generarán las unidades de respuesta hidrológica (HRU), posteriormente ingresaremos los datos climáticos como la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas, para finalmente proceder con la simulación. Luego de la

simulación, será necesario realizar el análisis de sensibilidad y la calibración al modelo, esta tarea será desarrollada con la herramienta SWAT-CUP, se evaluará el rendimiento del modelo mediante índices estadísticos recomendados por Moriasi *et al.* (2007), tanto en la fase de calibración como en la de validación.

El diagrama de flujo presente en la Figura 6, representa el procedimiento secuencial que se siguió en el presente estudio.

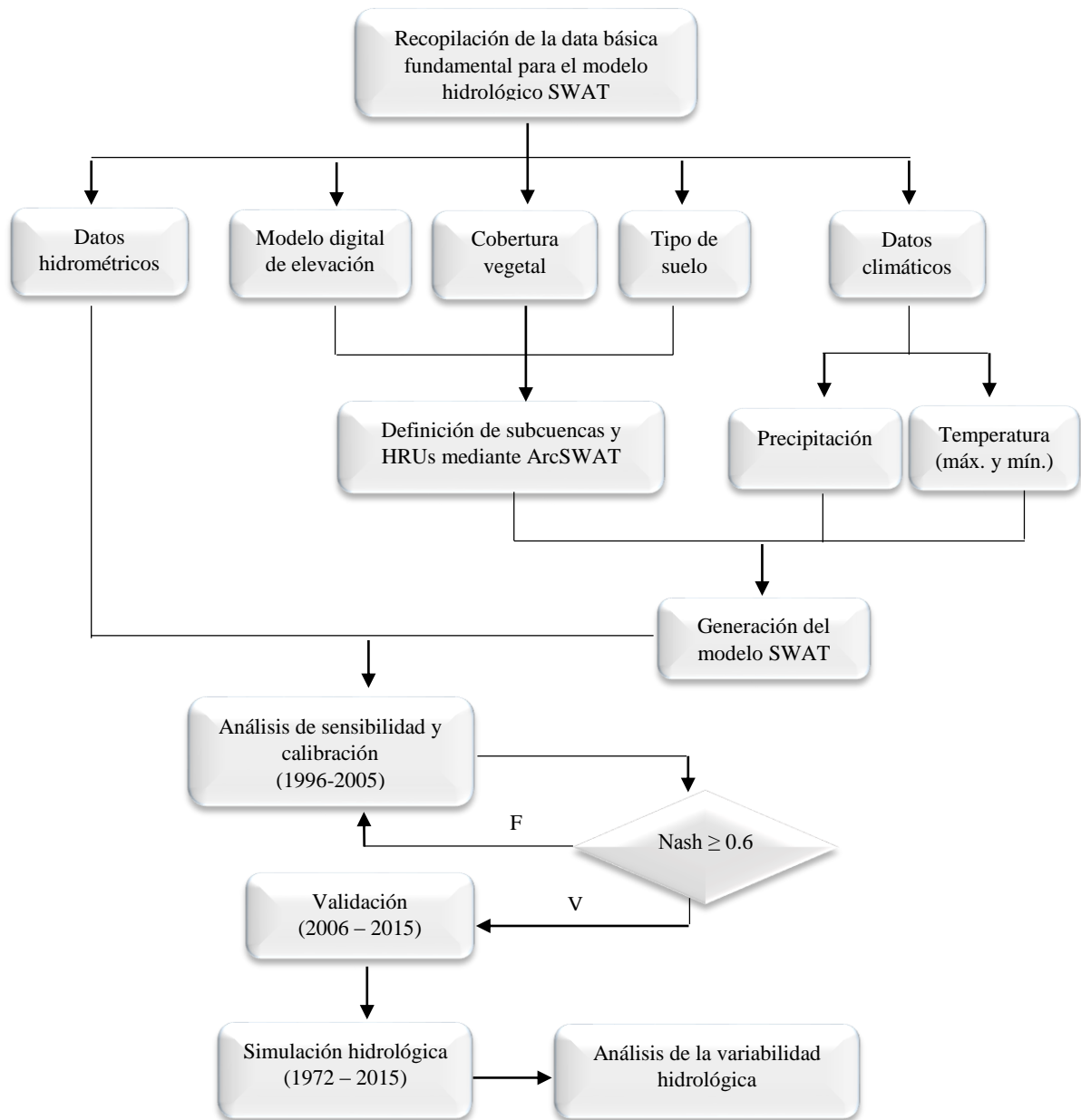


Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente estudio

3.3.1. Análisis y control de calidad de datos meteorológicos

a. Completación de datos faltantes

SWAT permite trabajar con data incompleta tanto de precipitación como de temperatura, debido a que genera la precipitación mediante un modelo de cadena de primer orden de Markov que establece un día como húmedo o seco. Pero debido a la ausencia de datos en algunos años y salidas inconsistentes en la etapa de prueba, sobre todo en los periodos secos, se optó por la completación de datos mediante el uso del paquete estadístico R, Climatol (Guijarro, 2018), el cual lleva implementadas diferentes funciones que permiten llevar a cabo una depuración de los datos, mediante un análisis de outliers, y de homogeneidad, así como un relleno de lagunas en las series.

b. Análisis exploratorio de datos (AED)

El primer análisis al registro de cada estación se llevó a cabo mediante la elaboración de graficas de precipitación total diaria con la finalidad de detectar visualmente posibles inconsistencias (saltos o tendencias). En la Figura 7, se observan los periodos cíclicos y algunos picos que serán evaluados posteriormente mediante el análisis estadístico.

En la Figura 8, se encuentran los diagramas de cajas (Box Plot) de precipitación acumulada de las estaciones a escala mensual, de esta manera podemos observar que solo dos estaciones no presentan el comportamiento normal de un ciclo anual, que consiste en tener la mayor cantidad de lluvia acumulada entre los meses de noviembre a marzo, y esto se debe a que dichas estaciones, La Joya y Pampa Blanca, se encuentran en la parte baja de la cuenca, muy cercanas al mar, por lo que prácticamente su precipitación durante todo el año es cero.

Se elaboró también la distribución de frecuencia relativa porcentual de lluvia a escala diaria como se observa en la Figura 9, donde se aprecia una clara asimetría debido a la escala, ya que los días con precipitación cero, son mayores en proporción al resto que si presentan registro alguno.

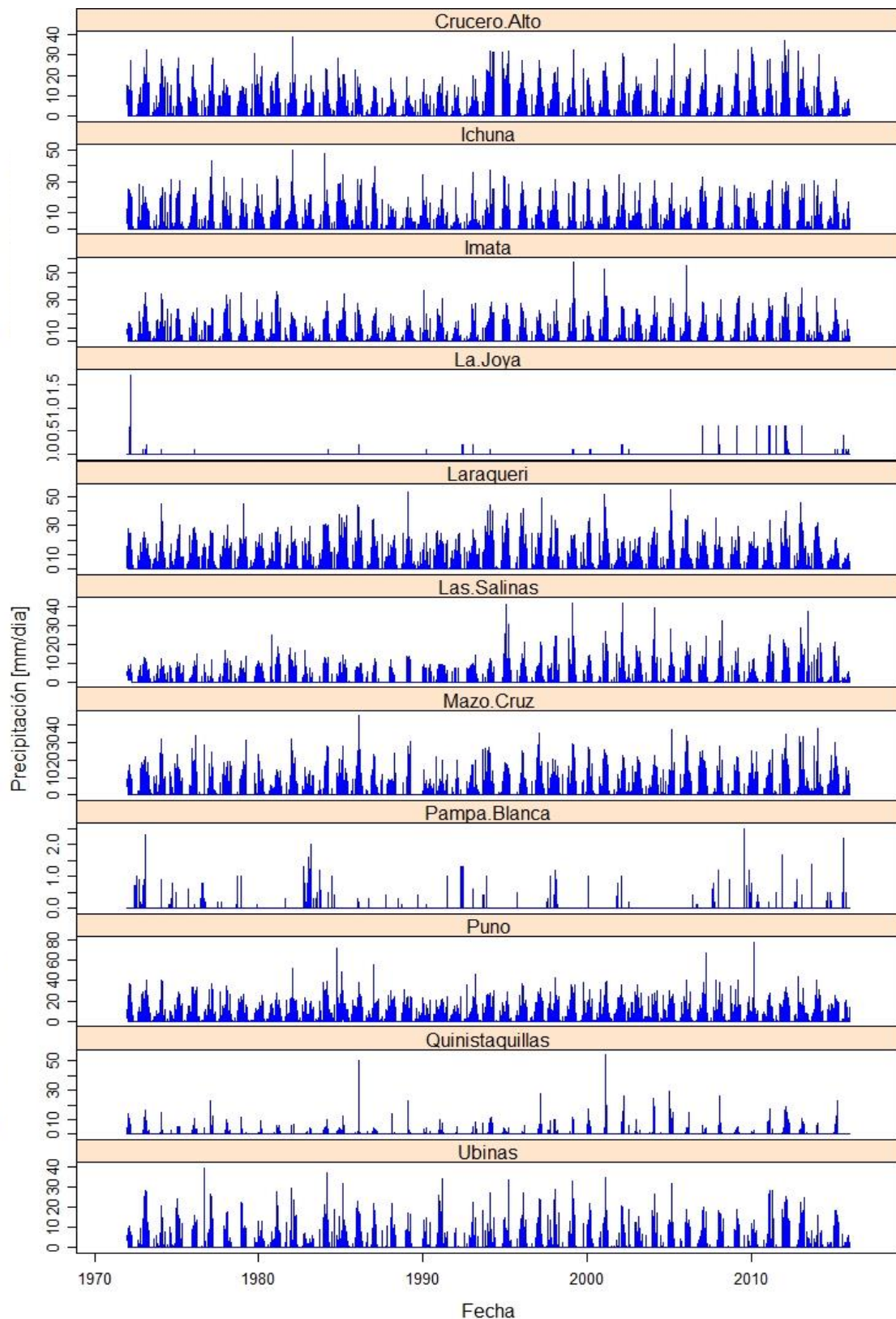


Figura 7: Variación de precipitación total diaria de las estaciones con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015

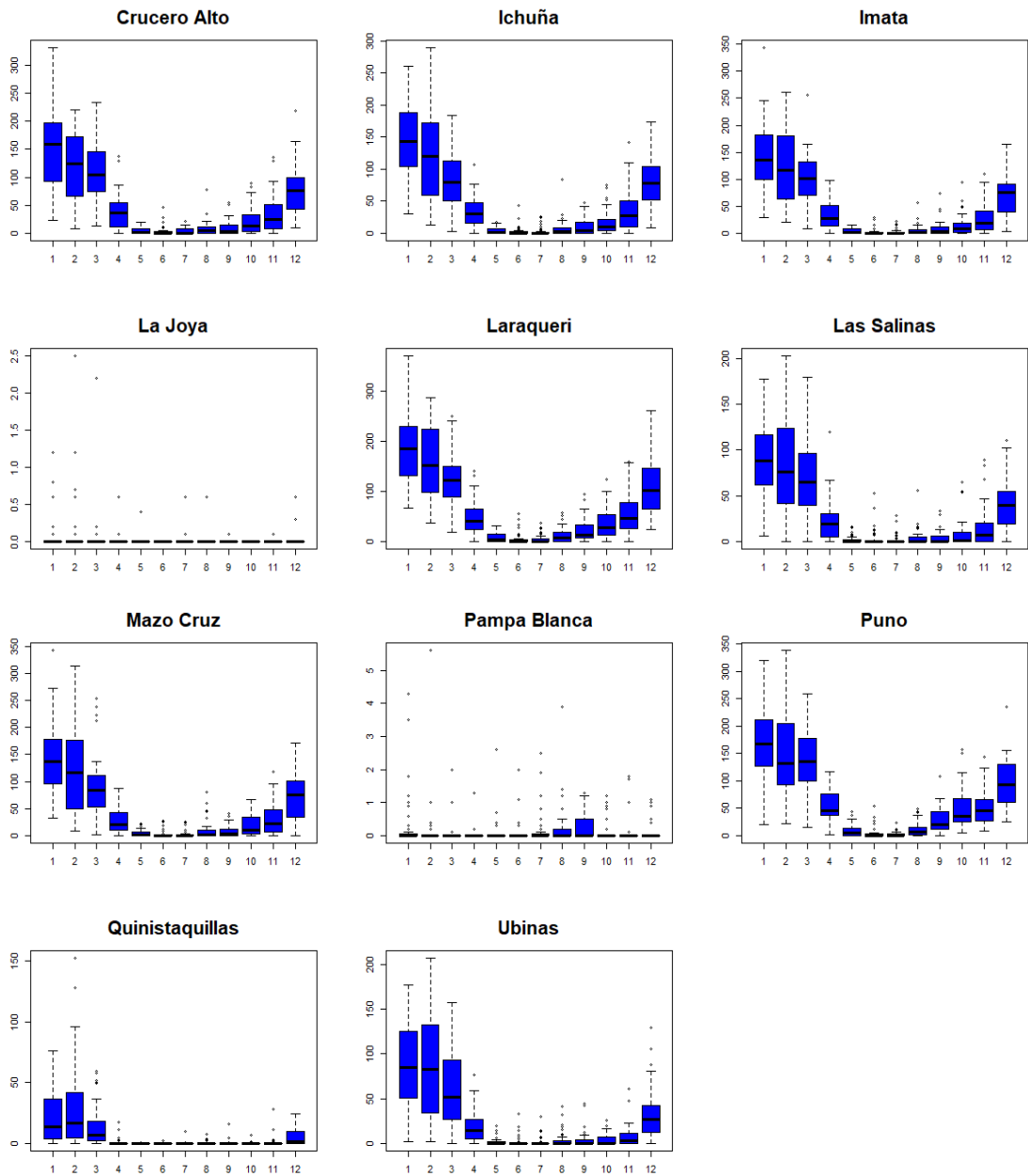


Figura 8: Diagrama de cajas (Box Plot) de la precipitación acumulada mensual de las estaciones con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015

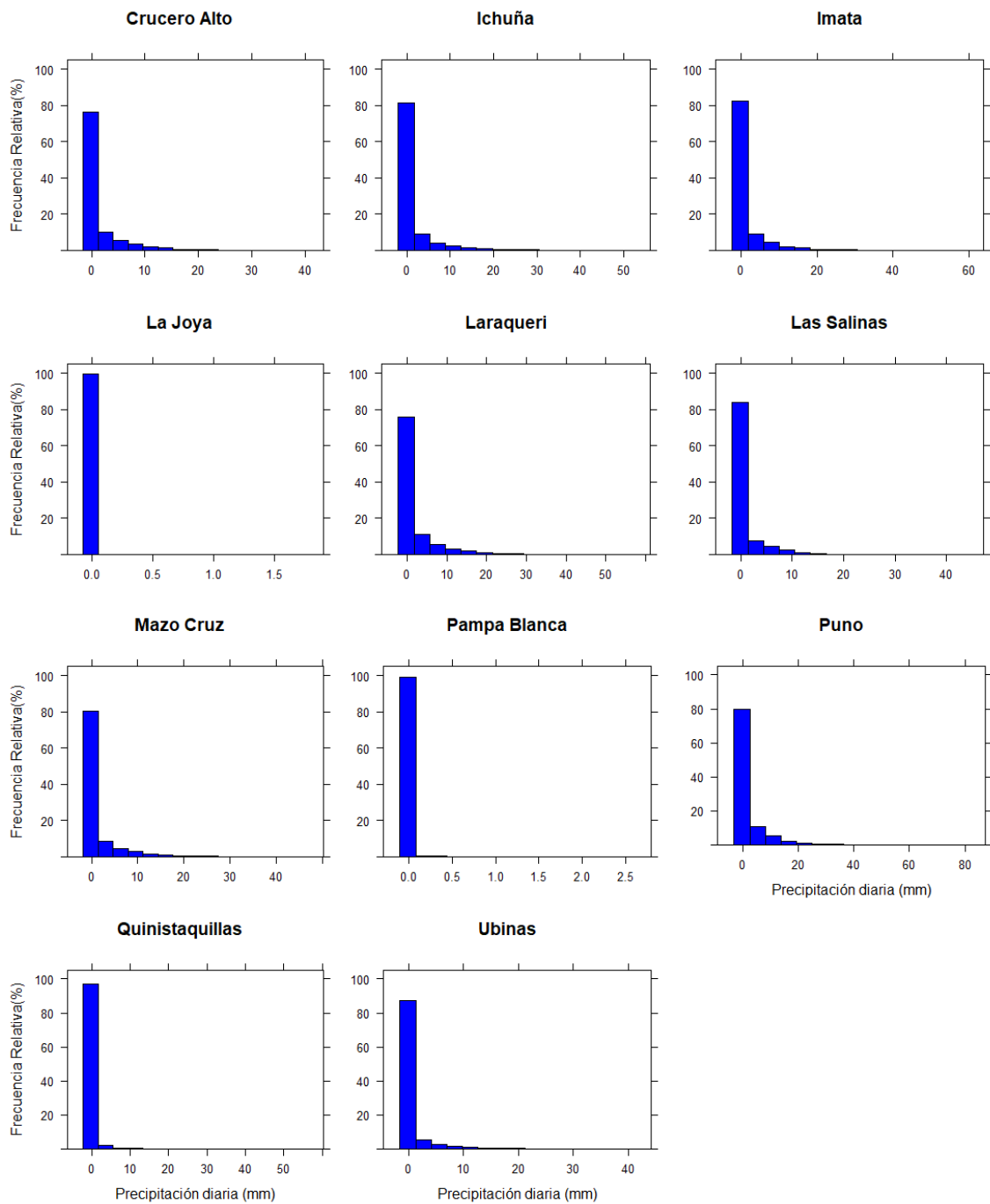


Figura 9: Distribución de frecuencia relativa porcentual (%) de precipitación diaria con periodo 01/01/1972 – 31/12/2015

c. Análisis de doble masa

Mediante la elaboración de la matriz de correlación de precipitación de las estaciones en estudio (Figura 10), se aprecia que a excepción de La Joya y Pampa Blanca, todas presentan un valor superior o igual a 0.7, por lo que se han formado dos grupos teniendo en cuenta su factor de correlación y ubicación geográfica.

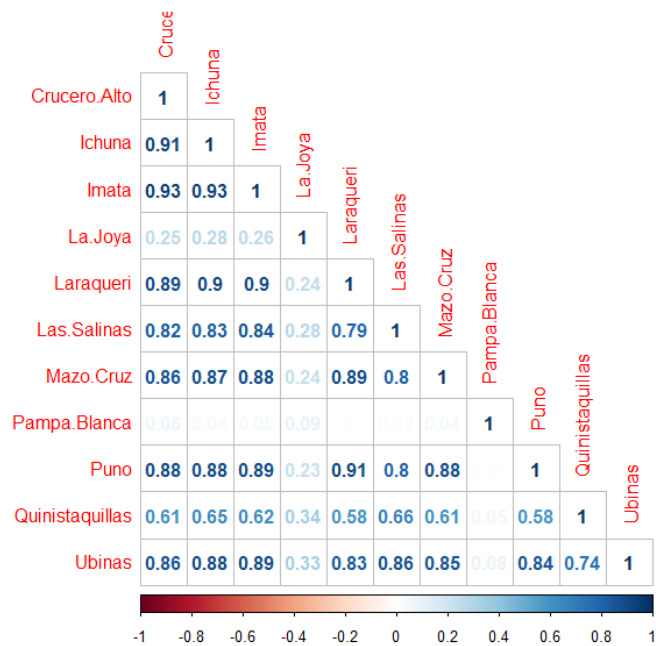


Figura 10: Matriz de correlación de precipitación acumulada mensual de las estaciones disponibles

A continuación en el grupo 1 de la Figura 11, se puede observar un claro alineamiento entre las nueve estaciones en análisis, a diferencia de las estaciones del grupo 2, ubicadas en la costa, que presentan algunos quiebres que serán contrastados por el respectivo análisis estadístico.

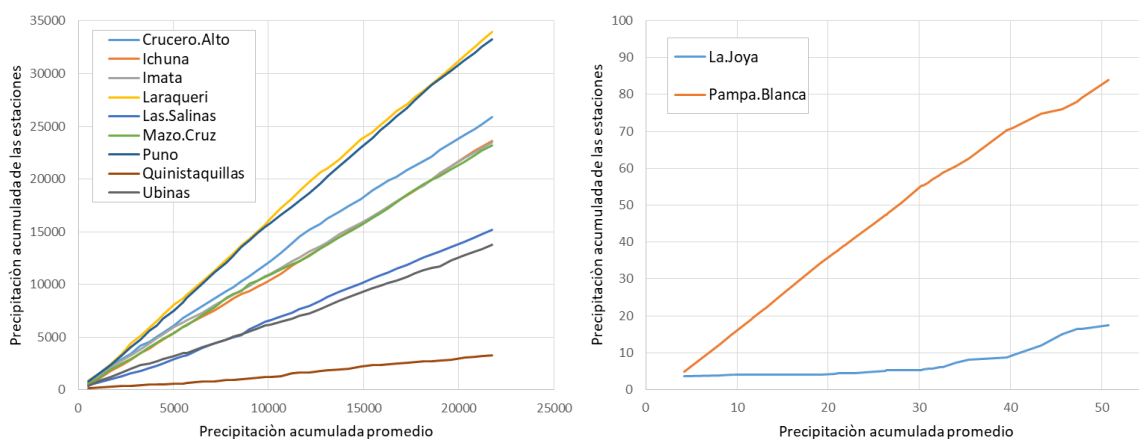


Figura 11: Análisis de curva de doble masa de los grupos 1 y 2 respectivamente

d. Análisis de homogeneidad

Luego del concluir con el análisis gráfico y el diagrama de doble masa, se procedió con el análisis estadístico donde se evaluó la consistencia de la media y la desviación estándar mediante las pruebas T de Student y F de Fisher respectivamente. La prueba T de Student busca probar que los valores medios (\bar{x}_1 , \bar{x}_2) de las submuestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% de significación, donde el valor absoluto del t de Student calculado (T_c) debe ser menor o igual al t de Student obtenido de la tabla estadística (T_t). De igual manera, la prueba F de Fisher consiste en probar, mediante la prueba F, si los valores de las desviaciones estándar de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes, con un 95% de probabilidad de significación; además se considera que, el F calculado (F_c) debe ser menor o igual al F tabular (F_t), obtenida de la tabla estadística (Villón, 2011). Ambas pruebas se realizaron con (n_1+n_2-2) y (n_1-1) , (n_2-1) grados de libertad respectivamente. En la tabla 5 se aprecian los resultados estadísticos de las precipitaciones diarias de todas las estaciones, donde se comprueba la consistencia de los datos para la media, mientras que para el análisis de la desviación estándar, las estaciones Las Salinas, La Joya y Pampa Blanca, presentaron cierta inconsistencia, sin embargo estas diferencias de desviaciones estándar para cada periodo de datos son mínimas, por lo tanto dichas estaciones fueron utilizadas en el presente estudio; cabe recalcar que las dos últimas están ubicadas en la costa por lo que prácticamente todos sus registros son ceros y son necesarias para la modelación.

Tabla 5: Resumen de los resultados de la prueba de homogeneidad en el periodo 01/01/1972 – 31/12/2015

ESTACIÓN	Periodo	Núm. de datos	Media	Varianza	Desv. Est.	T calculado	T de tabla	F calculado	F de tabla	Observación
Crucero Alto	ene 72 - dic 94	8766	1.66	13.85	3.72	1.69	1.96	1.03	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 95 - dic 15	7305	1.56	14.33	3.79					$(F_t \geq F_c)$ Consistente
Ichuña	ene 72 - dic 83	4383	1.41	16.35	4.04	1.07	1.96	1.02	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 84 - dic 15	11688	1.49	15.96	3.99					$(F_t \geq F_c)$ Consistente
Imata	ene 72 - dic 99	10227	1.44	15.36	3.92	0.56	1.96	1.04	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 00 - dic 15	5844	1.48	15.94	3.99					$(F_t \geq F_c)$ Consistente
La Joya	ene 72 - dic 06	12792	0.005	0.013	0.11	0.87	1.96	1.32	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 07 - dic 15	3279	0.007	0.017	0.13					$(F_t \geq F_c)$ Inconsistente
Laraqueri	ene 72 - dic 92	7671	2.12	23.64	4.86	0.23	1.96	1.02	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 93 - dic 15	8400	2.10	24.13	4.91					$(F_t \geq F_c)$ Consistente
Las Salinas	ene 72 - dic 03	11688	1.08	7.75	2.78	1.69	1.96	1.12	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 04 - dic 15	4383	0.99	8.75	2.96					$(F_t \geq F_c)$ Inconsistente
Mazo Cruz	ene 72 - dic 02	11323	1.44	14.10	3.75	0.17	1.96	1.03	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 03 - dic 15	4748	1.45	14.61	3.82					$(F_t \geq F_c)$ Consistente
Pampa Blanca	ene 72 - dic 92	7671	0.006	0.006	0.08	1.08	1.96	1.18	1.04	$(T_t \geq T_c)$ Consistente
	ene 93 - dic 15	8400	0.005	0.005	0.07					$(F_t \geq F_c)$ Inconsistente

«continuación»

Puno	ene 72 - dic 99	10227	2.07	24.64	4.96	0.14	1.96	1.00	1.04	($T \geq T_c$) Consistente
	ene 00 - dic 15	5844	2.06	24.83	4.98					($F \geq F_c$) Consistente
Quinistaquillas	ene 72 - dic 02	11323	0.21	1.94	1.39	0.10	1.96	1.02	1.04	($T \geq T_c$) Consistente
	ene 03 - dic 15	4748	0.20	1.90	1.38					($F \geq F_c$) Consistente
Ubinas	ene 72 - dic 01	10959	0.85	8.36	2.89	0.67	1.96	1.00	1.04	($T \geq T_c$) Consistente
	ene 02 - dic 15	5113	0.88	8.38	2.89					($F \geq F_c$) Consistente

3.3.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico

a. Modelo digital de elevación y generación de pendientes

Para delimitar las subcuencas y calcular la red hídrica de la zona, se utilizó el modelo digital del terreno ASTERG DEM a una resolución espacial de 30 metros. En la Figura 12, se muestra el DEM que el ArcSWAT utiliza para generar lo mencionado, además de un raster de pendientes que fueron establecidos en un rango de 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-45%, 45>%, y que en conjunto con los demás componentes del modelo permitirán generar las unidades de respuesta hidrológica (HRU). Cabe señalar que es necesario ingresar manualmente el punto de control de caudal en la cuenca, ya que este será el punto de partida para la delimitación de las subcuencas.

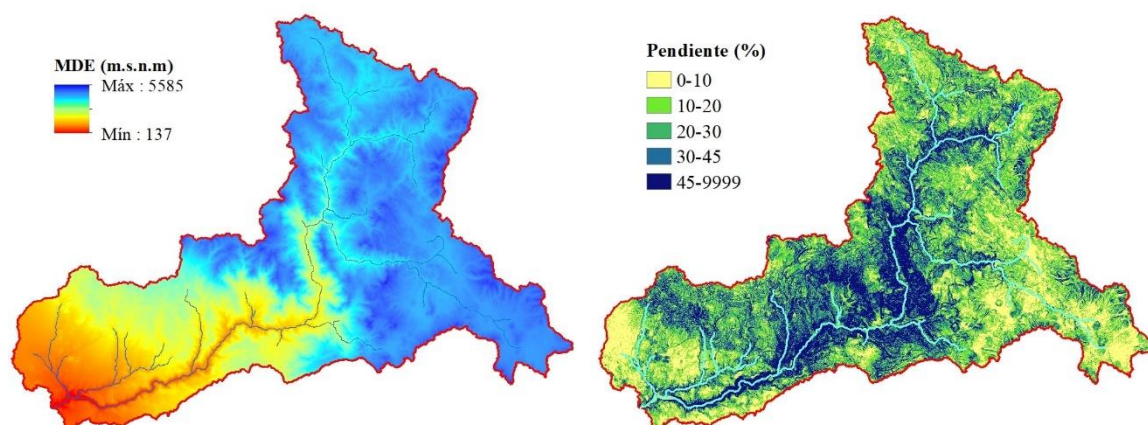


Figura 12: Modelo digital de elevación (panel izquierdo), pendientes generadas (panel derecho)

b. Cobertura vegetal y tipo de suelo

El mapa de cobertura vegetal (global) que se muestra en la Figura 13 (panel izquierdo), se obtuvo del proyecto ESA CCI-LC (European Space Agency and Climate Change Initiative-Land Cover) a una resolución espacial de 30 metros, año 2012. En la Tabla 6, se aprecian los códigos luego de la reclasificación, los cuales se encuentran en la base de datos del

SWAT, de esta manera el modelo reconoce la información y esta queda lista para ser procesada. El porcentaje de área ocupada por cada uso de suelo es el siguiente: PAST (51.34 %), BARR (40.54 %), FRST (5.67 %), AGRL (1.27 %), WATR (1.16 %), URML (0.02 %).

Tabla 6: Reclasificación del uso de suelo para el modelo

Unidades	Cobertura vegetal	Código Uso de suelo	Descripción SWAT Uso de suelo
1	Tierra agrícola genérica	AGRL	Agricultural Land-Generic
2	Bosque mixto	FRST	Forest-Mixed
3	Pasto	PAST	Pasture
4	Glaciar y cuerpos de agua	WATR	Water
5	Área urbana	URML	Residential-Med/Low Density
6	Área con escasa y sin vegetación	BARR	Barren

En la base de datos del modelo SWAT, solo se encuentra información de tipo de suelo concerniente a los Estados Unidos, país donde fue creado, por lo que es necesario ingresar la data a través de un archivo access con las características y propiedades de la zona a modelar, debido a esto, en el presente estudio se utilizó el mapa digital que incluyen todas las propiedades de suelo del mundo elaborado por la FAO-1995,2003. La clasificación concerniente a la zona de estudio se muestra en la Tabla 7, y la distribución espacial en la Figura 13 (panel derecho).

Tabla 7: Clasificación de suelos en el ámbito de estudio

Código	Nombre	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	CLAY (%)	SILT (%)	SAND (%)
I-Bh-Tv-c	Litosoles -	300	1.00	0.122	45.93	19	42	39
	Cambisoles húmicos - Andosoles vítricos	1000	1.10	0.122	24.75	21	32	47
I-Tv-c	Litosoles - Andosoles vítricos	300	1.10	0.098	29.78	16	42	42
		1000	1.20	0.098	16.69	20	33	47
GLACIER	Glaciar	1524	2.50	0.01	99	5	25	70
Tv6-b	Andosoles vítricos	300	1.10	0.129	30.51	16	43	41
		1000	1.20	0.129	18.08	19	33	48
Tv4-a	Andosoles vítricos	300	1.10	0.141	28.84	17	42	41
		1000	1.10	0.141	33.06	16	34	50
Je7-3a	Fluvisoles eutricos	300	1.40	0.175	3.96	42	40	18
		1000	1.30	0.175	7.22	42	38	20

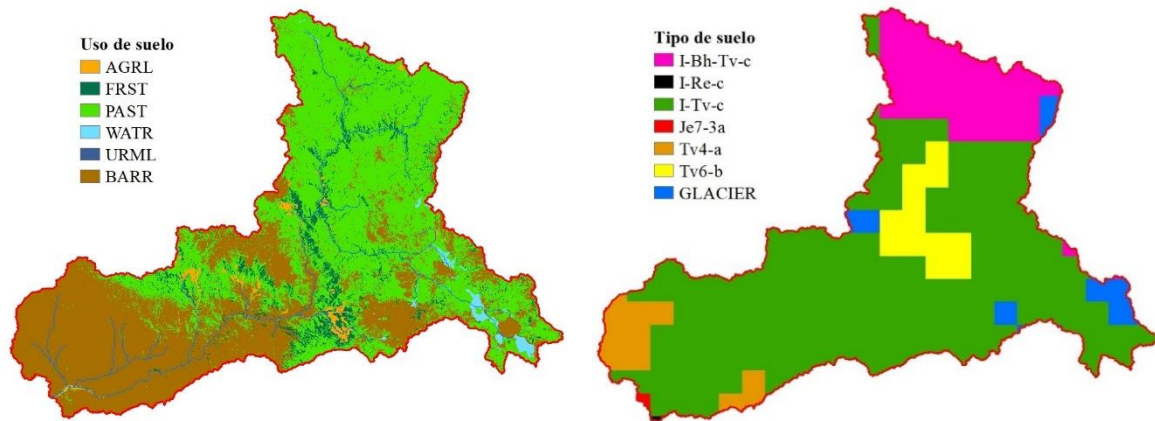


Figura 13: Variación espacial del uso de suelo (panel izquierdo), tipo de suelo (panel derecho)

A continuación, para hacer correr el modelo hidrológico SWAT, es necesario ingresar los datos climáticos como precipitación y temperaturas máximas y mínimas, la forma de hacerlo es mediante archivos de texto, cada estación tendrá sus datos en un archivo, y habrá uno que contara con los datos de todas las estaciones en cuanto a coordenadas, altitud, nombre y código. Posteriormente se deberá seleccionar una cantidad de años como periodo de calentamiento para el modelo, para el presente estudio se emplearon cuatro años. Finalmente se elegirá la escala de salida de los archivos, ya sea diaria, mensual o anual.

c. Análisis de sensibilidad

Luego de la simulación, es común que se observen desviaciones significativas entre lo observado y lo simulado, por lo que se procedió a la evaluación de los parámetros (Tabla 8) más representativos del modelo según diversos estudios, mediante el análisis de sensibilidad utilizando la herramienta SWAT-CUP (Abbaspour, 2012), la mencionada extensión de ArcSwat, a través del método SUFI-2 nos permitió realizar 500 simulaciones usando los registros diarios de 10 años que corresponden al periodo de calibración (1996 - 2005), esto con el objetivo de identificar y posteriormente modificar los parámetros más influyentes que repercutan en la salida de la cuenca.

Tabla 8: Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

Parámetro	Definición y unidades
v__SURLAG	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial
v__GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm)
v__RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo (fracción)
r__SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (mmH ₂ O/mm)
r__SOL_BD	Densidad aparente del suelo (gr/cm ³)

d. Calibración del modelo

Se definió un período de calibración a escala diaria de 10 años (1 de enero de 1996 al 31 de diciembre de 2005), en el que fueron representados los periodos húmedos y secos. La calibración se abordó para la cuenca en general, por lo que se modificaron simultáneamente los parámetros para todas las subcuencas y horizontes de suelo, aplicándose los mismos valores en cada subcuenca. Algunos parámetros se modificaron sustituyendo un valor por otro (v_x), y en las situaciones en que los parámetros diferirían entre HRUs, se optó por reducir o aumentar un porcentaje de los mismos (r_x). Como función objetivo se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (Percent bias - PBIAS) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), y su relación con la desviación estándar de las observaciones (RSR), los cuales son descritos a continuación:

- **Coefficiente de correlación de Pearson (r) y coeficiente de determinación (R^2):** El coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2) describen el grado de colinealidad entre los datos simulados y medidos. El coeficiente de correlación, que varía de -1 a 1 , es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados. Si $r = 0$, no existe una relación lineal. Si $r = 1$ o -1 , existe una relación lineal positiva o negativa perfecta. Del mismo modo, R^2 describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. R^2 varía de 0 a 1 , con valores más altos que indican una menor varianza de error, y típicamente se consideran aceptables valores mayores de 0.5 (Santhi *et al.*, 2001; Van Liew *et al.*, 2003).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2$$

Donde Q_{obs} representa los valores observados del caudal medio diario, Q_{sim} los valores simulados del caudal medio diario, \bar{Q}_{obs} la media de los caudales observados, \bar{Q}_{sim} la media de los caudales simulados y n el número de observaciones.

- **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):** la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de datos medida ("información") (Nash y Sutcliffe, 1970). NSE indica qué tan bien la gráfica de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1: 1. NSE varía entre $-\infty$ y 1.0, siendo $NSE = 1$ el valor óptimo. Los valores entre 0.0 y 1.0 generalmente se consideran niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores < 0.0 indican que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable (Moriasi *et al.*, 2007). NSE se calcula como se muestra en la ecuación :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$$

Donde Q_{obs} representa los valores observados del caudal medio diario, Q_{sim} los valores simulados del caudal medio diario, \bar{Q}_{obs} la media de los caudales observados y n el número de observaciones.

- **Porcentaje de sesgo (PBIAS):** El porcentaje de sesgo (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que sus contrapartes observadas. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación de modelo precisa. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación del modelo (Gupta *et al.*, 1999, citado por Moriasi *et al.*, 2007). PBIAS se calcula con la ecuación:

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

Donde Q_{obs} representa los valores observados del caudal medio diario, Q_{sim} los valores

simulados del caudal medio diario y n el número de observaciones.

- **Relación de desviación estándar de observaciones RMSE (RSR):** RSR se calcula como la relación del RMSE y la desviación estándar de los datos medidos, como se muestra en la ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}} \right]$$

RSR varía desde el valor óptimo de 0, que indica cero RMSE o variación residual y, por lo tanto, simulación perfecta del modelo, hasta un gran valor positivo. Cuanto menor sea el RSR, menor será el RMSE y mejor será el rendimiento de la simulación del modelo (Moriassi *et al.*, 2007) (Ver Tabla 9).

Tabla 9: Calificaciones generales de rendimiento para las estadísticas recomendadas

Rendimiento	RSR	NSE	PBIAS
Muy bueno	$0.00 < RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.0$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE < 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

FUENTE: Moriassi *et al.* (2007).

e. Validación del modelo

El periodo definido para esta etapa fue de 10 años (1 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2015). Los nuevos rangos de valores para los parámetros provenientes del proceso de calibración fueron reemplazados e ingresados nuevamente al modelo con el fin de comprobar y obtener un comportamiento similar en las lecturas de los caudales como se hizo en la fase previa. De esta manera el modelo nos permitió simular y proyectar los caudales hacia el pasado, es decir, ejecutar una modelación a partir del 1 de enero de 1972 (año inicial donde se dispone de datos de precipitación en la gran mayoría de estaciones) en adelante, y así evaluar la variabilidad hidrológica de la cuenca hasta el año 2015.

3.3.3. Variabilidad climática e hidrológica

Una vez generados los caudales desde el 1 de enero de 1976 hasta el 31 de diciembre de 2015, se procedió a evaluar los caudales más elevados de cada periodo decenal haciendo una comparación de ellos a nivel subcuencas, así también se realizó la evaluación de la disponibilidad hídrica al 75% de probabilidad de ocurrencia en general y por cada periodo decenal en tres subcuencas en específico, ubicadas en las zonas alta, media y baja de la cuenca, con los resultados obtenidos se comparó el balance hídrico realizado por el MINAGRI-ANA(2005) y el presente estudio. A continuación se procedió a evaluar la variabilidad climática en las partes alta, media y baja de la cuenca a través de la herramienta RCLimdex, la cual nos permitió calcular los 27 índices básicos recomendados por el equipo de expertos de CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (ETCCDMI) así como también otros índices de temperatura y precipitación diaria con límites definidos por el usuario. Para el análisis del caudal fueron adaptados dos índices (R95p, R99p); los cuales son descritos al final de la Tabla 11, que hace una descripción general de los 27 índices empleados en el presente estudio. Finalmente se realizó un análisis de la variabilidad hidrológica de la cuenca con respecto al antes y después del comienzo de operaciones del embalse Pasto Grande.

Las estaciones elegidas para este análisis fueron: Imata (Zona alta), Ubinas (Zona media) y Pampa Blanca (Zona baja), de las cuales se tomaron los valores máximos de las precipitaciones diarias, valores máximos y mínimos de la temperatura máxima y valores máximos y mínimos de la temperatura mínima de los 10 primeros años (1976 – 1985) del periodo total de análisis, con el fin de modificar los valores de referencia y adaptar los índices a cada una de las estaciones. En la Tabla 10, se muestran los valores descritos.

Tabla 10: Valores de referencia usados en el análisis de variabilidad climática con RCLimdex

Estación	Prcp (mm)	Temp. Máxima (°C)		Temp. Mínima (°C)	
		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Imata	25	19.2	6	2.9	-15
Ubinas	25	25	10.2	10	-4.4
Pampa Blanca	2	31.6	15.7	23	7.2

Tabla 11: Descripción de los 27 índices usados por RCLimdex

Índice	Descripción
Días de frío extremo (FDO)	Sea $Tnij$ la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando: $Tnij < 0^{\circ}\text{C}$
Días de calor extremo (SU25)	Sea $Txij$ la temperatura máxima diaria en el día i periodo j . Cuente el número de días cuando: $Txij > 25^{\circ}\text{C}$
Días de temperatura máxima muy fría (IDO)	Sea $Txij$ la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando: $Txij < 0^{\circ}\text{C}$
Noches tropicales (TR20)	Sea $Tnij$ la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando: $Tnij > 20^{\circ}\text{C}$
Duración de la estación de cultivo (GSL)	Sea Tij la temperatura media en el día i en el periodo j . Cuente el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con: $Tij > 5^{\circ}\text{C}$ Y la primera ocurrencia después de 1st Julio (1st Enero en HS) de por lo menos 6 días consecutivos con: $Tij < 5^{\circ}\text{C}$
Máxima temperatura máxima (TXx)	Sea $Txkj$ la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces: $TXxkj = \max(Txkj)$
Máxima temperatura mínima (TNx)	Sea $Tnkj$ la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces: $TNxkj = \max(Tnkj)$
Mínima temperatura máxima (TXn)	Sea $Txkj$ la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces: $TXnkj = \min(Txkj)$
Mínima temperatura mínima (TNn)	Sea $Tnkj$ la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces: $TNnkj = \min(Tnkj)$
Noches frías (Tn10p)	Sea $Tnij$ la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tnin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tnij < Tnin10$
Días fríos (Tx10p)	Sea $Txij$ la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Txij < Txin10$
Noches calientes (Tn90p)	Sea $Tnij$ la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tnin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Tnij > Tnin90$
Días calientes (Tx90p)	Sea $Txij$ la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde: $Txij > Txin90$
Indicador de la duración de los periodos calientes (WSDI)	Sea $Txij$ la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos: $Txij > Txin90$
Indicador de la duración de los periodos fríos (CSDI)	Sea $Tnij$ la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tnin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos: $Tnij < Tnin10$
Rango diurno de temperatura (DTR)	Sean $Txij$ y $Tnij$ las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces: $DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I Tx_{ij} - Tn_{ij}}{I}$
Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1day)	Sea $RRij$ el total diario de precipitación en el día i en el periodo j . Entonces los valores máximos de 1-día para el periodo j son: $Rx1day_j = \max(RRij)$
Cantidad máxima de precipitación en 5 días (Rx5day)	Sea $RRkj$ la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en k , periodo j . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo j son: $Rx5day_j = \max(RRkj)$

«continuación»

Índice simple de intensidad diaria (SDII)	Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, $w(RR \geq 1mm)$ en el periodo j . Si W representa el número de días húmedos en j , entonces:
	$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$
Número de días con precipitación intensa (R10)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuenta el número de días donde: $RR_{ij} \geq 10mm$
Número de días con precipitación muy intensa (R20)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuenta el número de días donde: $RR_{ij} \geq 20mm$
Número de días sobre nmm de precipitación (Rnn)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde: $RR_{ij} \geq nmm$
Días secos consecutivos (CDD)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuenta el más grande número de días consecutivos donde: $RR_{ij} < 1mm$
Días húmedos consecutivos (CWD)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuenta el más grande número de días consecutivos donde: $RR_{ij} \geq 1mm$
Días muy húmedos (R95p)	Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y sea RR_{wn95} el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1972-2015. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces: $R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{where} \quad RR_{wj} > RR_{wn95}$
Días extremadamente húmedos (R99p)	Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y sea RR_{wn99} el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1972-2015. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces: $R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{where} \quad RR_{wj} > RR_{wn99}$
Precipitación total anual en los días húmedos (PRCPTOT)	Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces $PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$
*C95P (Caudal anual total en que CC > 95percentil)	Registra caudales que se ubican dentro del percentil 95. Los datos dentro del percentil 95 son valores muy altos de caudal dentro de todos los datos registrados.
*C99P (Caudal anual total en que CC > 99percentil)	Este índice cuenta los días que presentan valores extremadamente altos de caudal y que representan datos dentro del percentil 99. Aquellos días con caudales mayor a 1mm y que tengan registros dentro del percentil 99, se contabilizan en este índice.
	*Índices de precipitación adaptados para analizar el caudal en el presente estudio (Tapia, 2016).

FUENTE: Zhang *et al.* (2004), Tapia (2016)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

El modelo delimita la cuenca aguas arriba del punto de control de caudal, de esta manera el área total delimitada a partir de la estación de aforo Santa Rosa fue de 12902.16 Km². En la Figura 14 se muestran las 55 subcuencas obtenidas considerando un umbral mínimo de área de drenaje establecido en 15000 ha. La cantidad de subcuencas definidas dependerá del nivel de detalle que el modelador desee con el fin de obtener resultados más específicos, con lo cual lo llevara a tomar mejores decisiones dependiendo de la zona a modelar. Así mismo fueron creados un total de 444 HRU en la zona de estudio. El análisis de sensibilidad y calibración del modelo se llevó a cabo con los datos de la estación de aforo ubicada en la subcuenca 55.

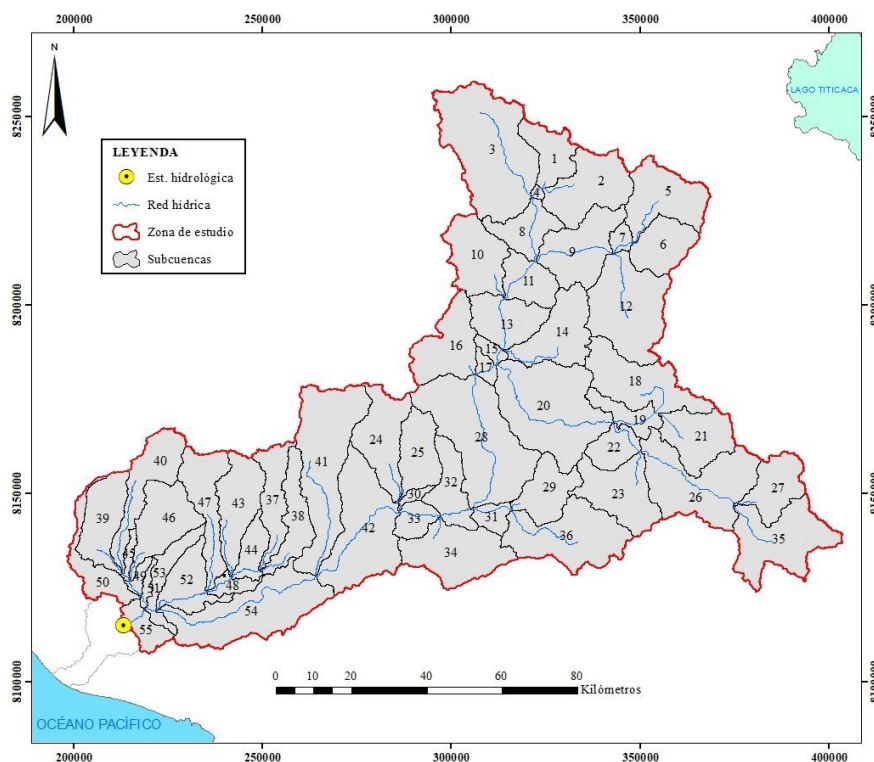


Figura 14: Resultado de subcuencas delimitadas en la zona de estudio

A continuación, en la Figura 15 se presentan las isoyetas de las isoyetas de las precipitaciones medias mensuales (mm) obtenidas de la precipitación diaria proveniente de las estaciones utilizadas en el presente estudio, para el periodo húmedo correspondiente a los meses de diciembre a marzo, y el periodo seco comprendido entre abril y noviembre. Para el periodo húmedo se tiene una media mensual de hasta 120 mm en las zonas altas de la cuenca, mientras que en la zona media se alcanza entre 70 y 80 mm, en el periodo seco se observa una media mensual que llega hasta los 16 mm en la zona alta, mientras que en la zona media este valor disminuye hasta llegar a 6 mm. Por lo mencionado, queda claro que el mayor aporte de caudal se genera en la parte alta de la cuenca, ya que es aquí donde se generan la mayor cantidad de precipitaciones, la zona media y baja tienen un protagonismo menor.

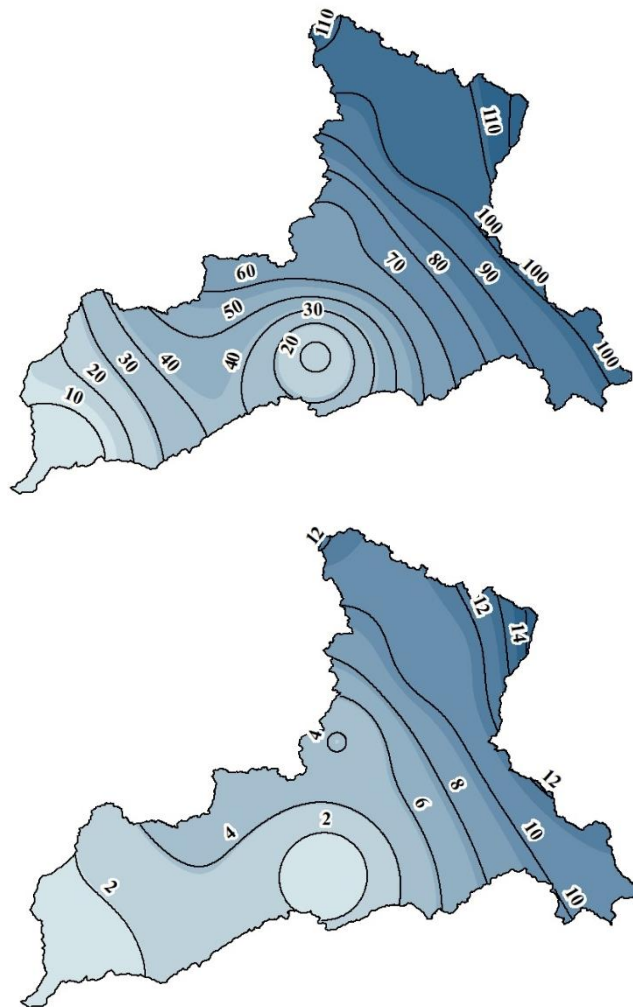


Figura 15: Isoyetas en época húmeda (panel superior), y seca (panel inferior)

4.1.1. Análisis de sensibilidad, calibración y validación

En la Figura 16 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad mediante la herramienta SWATCUP, los presentes parámetros fueron recomendados por el artículo “Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage” publicado en 2020, donde los más significativos son: Coeficiente de retraso de la escorrentía superficial (SURLAG), coeficiente de percolación al acuífero profundo (RCHRG_DP) y la capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (SOL_AWC).

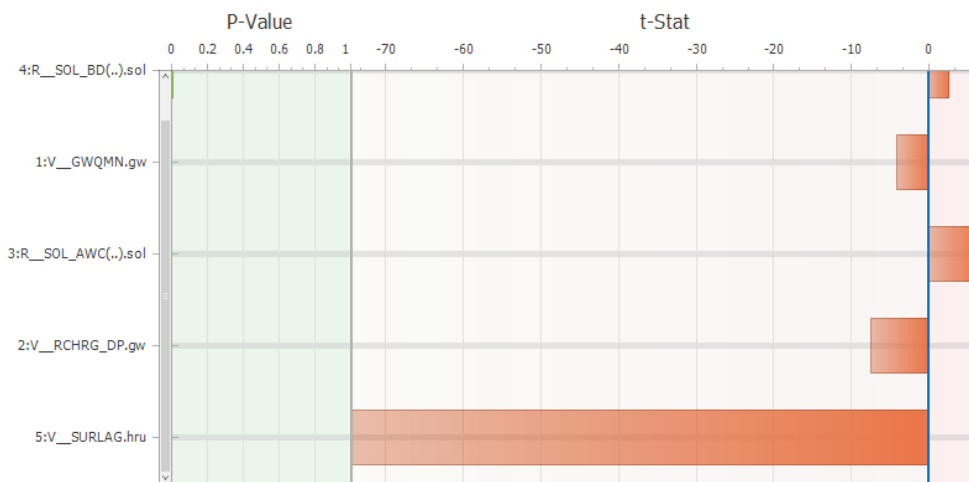


Figura 16: Resultado del análisis de sensibilidad del modelo

El factor t-Stat, representa la sensibilidad de cada parámetro, por lo que a mayor valor absoluto, mayor sensibilidad; en cuanto al factor P-Value, este determina la significancia de la sensibilidad, aquellos valores más cercanos a cero, serán los de mayor significancia. En la Tabla 12 se muestran los parámetros más sensibles clasificados mediante un ranking.

Tabla 12: Resultado del análisis de sensibilidad del modelo

Parámetro	t-Stat	P-Value	Ranking
v__SURLAG	-74.369	0.000	1
v__RCHRG_DP	-7.488	0.000	2
v__GWQMN	6.520	0.000	3
r__SOL_AWC	-4.172	0.001	4
r__SOL_BD	2.617	0.009	5

Los resultados de la calibración a escala diaria y mensual se muestran en la Figura 17,

mediante la evaluación estadística recomendada por Moriasi, se obtuvieron rendimientos calificados como "muy buenos" a escala mensual, mientras que a escala diaria se obtuvieron rendimientos entre "buenos" y "satisfactorios" (ver Tabla 13), es importante mencionar que la calificación de rendimientos recomendada por Moriasi en sus investigaciones, fue elaborada en base a una escala mensual, por lo que podemos deducir que, los resultados obtenidos a escala diaria en el presente estudio son óptimos dado que se trabajó con un total de 7300 datos de caudal correspondientes a ambas etapas de calibración y validación.

De igual forma en la Figura 18, se muestran los resultados de la validación tanto a escala diaria como mensual. En esta fase los rendimientos a escala mensual decaen al calificativo de "buenos", mientras que a escala diaria se muestran como "satisfactorios", los valores de los estadísticos evaluados se observan en la Tabla 13.

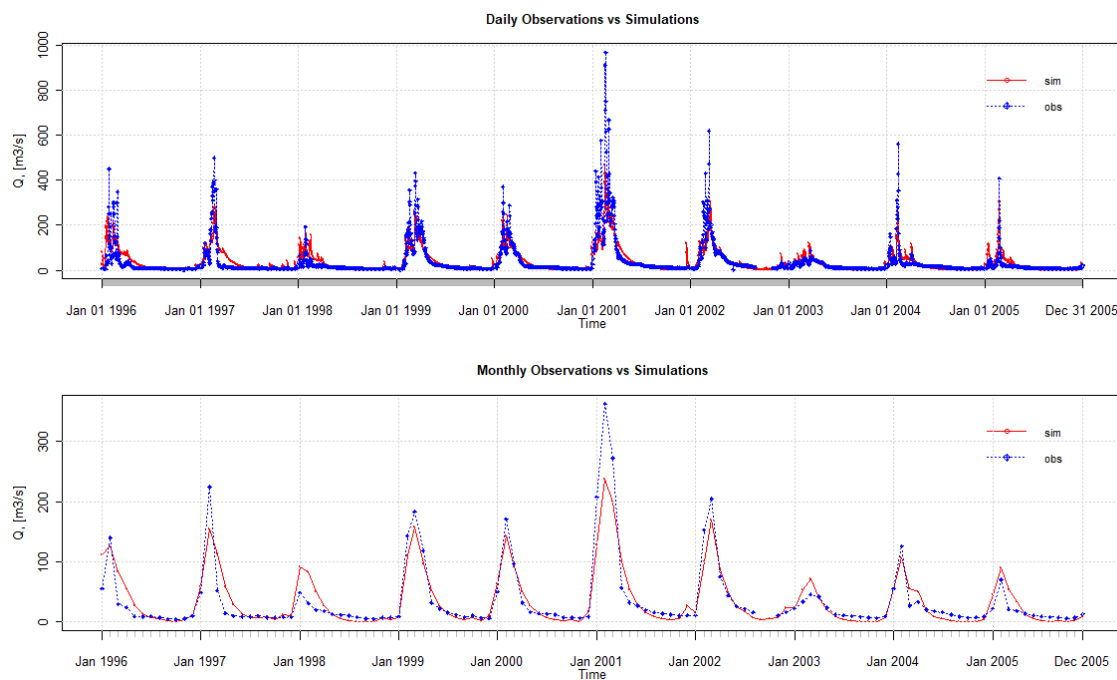


Figura 17: Resultado de la calibración del modelo a escala diaria (panel superior) y mensual (panel inferior). Caudal simulado (rojo) y caudal observado (azul)

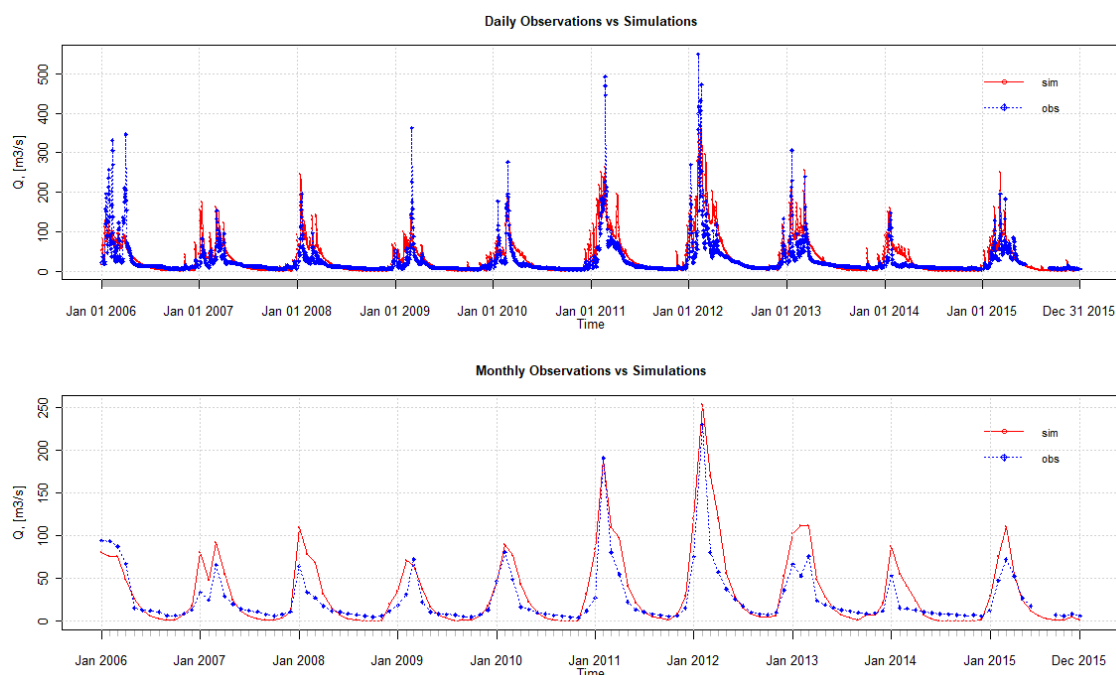


Figura 18: Resultado de la validación del modelo a escala diaria (arriba) y mensual (abajo). Caudal simulado (rojo) y caudal observado (azul)

Tabla 13: Valores de los índices de rendimiento a escala diaria y mensual

Índices de rendimiento	Escala diaria		Escala mensual	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	0.65	0.53	0.83	0.64
Relación de desviación estándar de observaciones RMSE (RSR)	0.6	0.67	0.41	0.62
Coefficiente de determinación de Pearson (R^2)	0.65	0.62	0.84	0.83
Porcentaje de sesgo (PBIAS)	-1.3	19.4	-1.7	19

Los nuevos valores de los parámetros obtenidos luego de la calibración del caudal, se describen en la Tabla 14, cada valor ajustado fue reemplazado en la fase de validación presentando así un buen desempeño en el modelo de la cuenca en estudio.

Tabla 14: Resultado de los parámetros calibrados del modelo

Parámetros	Definición y unidades	Valor Inicial	Valor Ajustado
v_GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm)	1000	401.35
v_RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo (fracción)	0.05	0.3
r_SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (mmH ₂ O/mm)	0.01 – 0.175	0.01 – 0.23 (+0.29)
r_SOL_BD	Densidad aparente del suelo (gr/cm ³)	1 – 2.5	1 – 1.8 (-0.27)
v_SURLAG	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	1	0.1

*El calificador (r_) indica que el parámetro se multiplica por 1 más el valor.

El calificador (v_) se refiere a la sustitución del parámetro por el valor.

4.1.2. Simulación de caudales

Analizaremos primero el comportamiento de la cuenca en general a lo largo de las cuatro décadas mediante los valores de los componentes del balance hídrico promedio y la evolución temporal de dichos componentes. Los valores de los componentes del balance hídrico promedio anual se muestran en la Tabla 15, donde se aprecia que el mayor aporte al sistema es la precipitación (232.58 mm), de este aporte se pierden hacia la atmósfera mediante la evapotranspiración real (145.94 mm) que representa el 63%, mientras que el rendimiento hídrico tiene un valor de 87.7 mm equivalente al 37%. De este rendimiento, el 71% pertenece al flujo base (62.14 mm), quien a su vez tiene como contribuyente al Flujo Lateral (15.87 mm) correspondiente al 25.5%, le siguen el flujo de retorno desde el acuífero superficial (32.15 mm) equivalente al 51.7% y el flujo de retorno desde el acuífero profundo (14.12 mm) equivalente al 22.7%. Finalmente el aporte de la escorrentía superficial (25.48 mm) al rendimiento hídrico corresponde al 29 %.

Tabla 15: Balance hídrico del promedio anual en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

Componentes del balance hídrico promedio anual	Cuenca Tambo
Área de la cuenca [Km ²]	12902.16
Aporte al sistema	
-Precipitación [mm]	232.58
-Nieve [mm]	0.3
-Derretimiento de la nieve [mm]	0.3
Pérdida hacia la atmósfera	
-Evapotranspiración real [mm]	145.94
-Sublimación [mm]	0
Rendimiento en la salida de la cuenca	
-Rendimiento hídrico [mm]	87.7
-Contribución de escorrentía superficial [mm]	25.48
-Contribución de flujo base [mm]	62.14
-Flujo lateral [mm]	15.87
-Flujo de retorno desde el acuífero superficial [mm]	32.15
-Flujo de retorno desde el acuífero profundo [mm]	14.12

El balance hídrico anual de la Figura 19, resume el movimiento del agua (hm³) tanto en entradas como en salidas, donde la sumatoria de los componentes debe ser cero, como se aprecia en la Tabla 16. En la Figura 18 se observa que los caudales generados y el agua consumida a través de la evapotranspiración en los meses de marzo a setiembre son generados por la precipitación y la contribución de la humedad almacenada en el suelo durante los meses anteriores. El volumen del rendimiento hídrico, el cual se entiende como

la suma de la escorrentía y el caudal base, tiene un promedio anual de 94.3 hm³, que equivale a un caudal de 36,38 m³/s.

Mediante la Figura 20 podemos apreciar el comportamiento de los principales componentes en cada una de la subcuencas en términos de promedios anuales; en cuanto a las precipitaciones, es evidente que es en las partes altas donde se presentan los mayores valores, estos se encuentran entre 303.11 mm y 763.47 mm, para posteriormente ir descendiendo progresivamente hacia la parte media y baja de la cuenca en estudio. La contribución de flujo base presenta valores en la zona alta entre 25.47 mm y 153.48 mm, mientras que la contribución de escorrentía superficial se encuentra entre 12.93 mm y 72.21 mm, estos valores podrían llevar a tomar acciones correspondientes en cada subcuenca, al identificar las zonas con mayor escorrentía para así evitar la erosión de los suelos y favorecer al flujo base mediante prácticas de conservación. Finalmente la evapotranspiración real presenta sus valores más altos en muchas de las subcuencas de la zona alta encontrándose entre 284.19 mm y 357.81 mm, se presentan también valores que oscilan entre 68.4 mm y 284.19 mm en las subcuencas restantes de la misma zona, esto muestra la alta tasa de evapotranspiración relacionada a la cobertura vegetal de la zona.

En la Figura 21, se muestra la evolución temporal promedio diaria de los procesos hidrológicos tales como precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de escorrentía superficial y contribución de flujo base, de la cuenca en estudio.

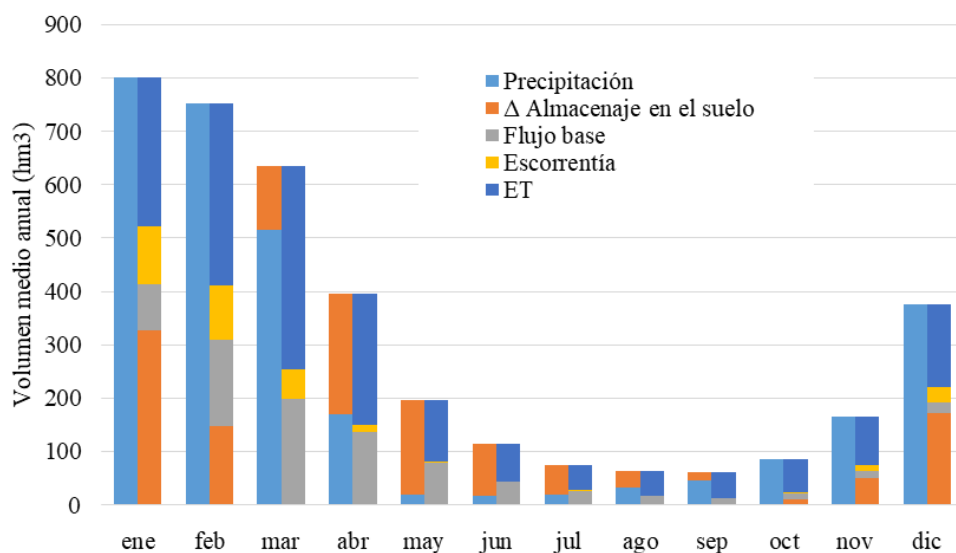


Figura 19: Balance hídrico natural del promedio anual en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

Tabla 16: Balance hídrico mensualizado del promedio anual en la cuenca del río Tambo (hm³)

Tambo	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	total
Precipitación	802.1	752.0	514.8	170.7	20.2	17.4	18.7	31.6	45.6	86.7	165.1	375.9	3000.8
ET	-279.8	-341.2	-380.3	-244.7	-116.5	-70.0	-46.8	-45.9	-49.6	-62.5	-91.1	-154.6	-1882.9
Escorrentía	-109.2	-102.0	-56.5	-14.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-1.1	-3.3	-10.4	-30.2	-328.7
Flujo base	-86.7	-160.7	-197.6	-136.5	-80.1	-43.7	-26.8	-17.4	-11.8	-9.7	-12.4	-19.4	-802.8
Δ Almacenaje en el suelo	-326.4	-148.1	119.5	224.9	176.9	96.7	55.4	32.1	16.8	-11.2	-51.2	-171.7	13.7

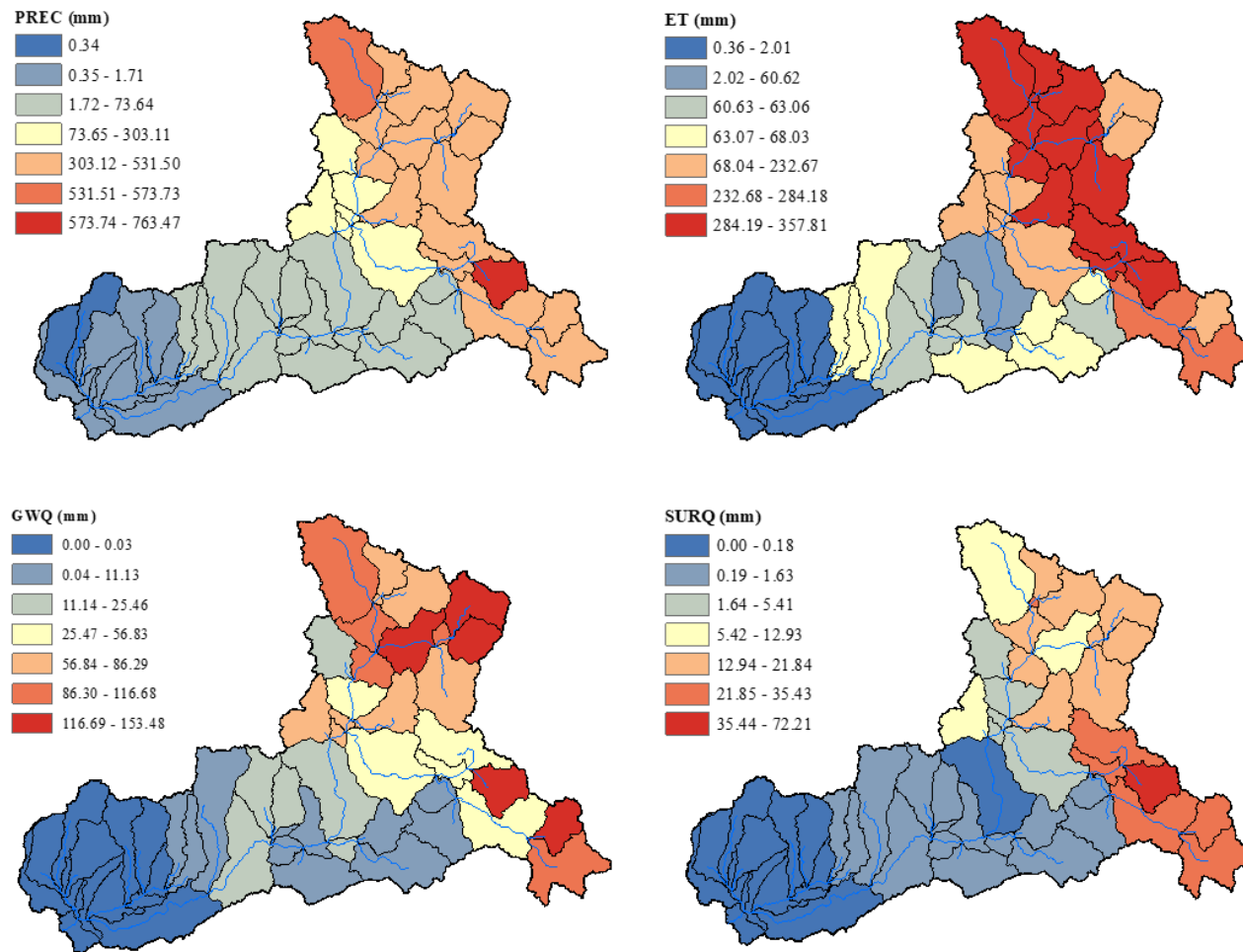


Figura 20: Distribución espacial de precipitación (PREC), evapotranspiración (ET), contribución de flujo base (GWQ) y contribución de escorrentía superficial (SURQ). En términos de promedios anuales para el periodo 1976-2015 a nivel de subcuencas

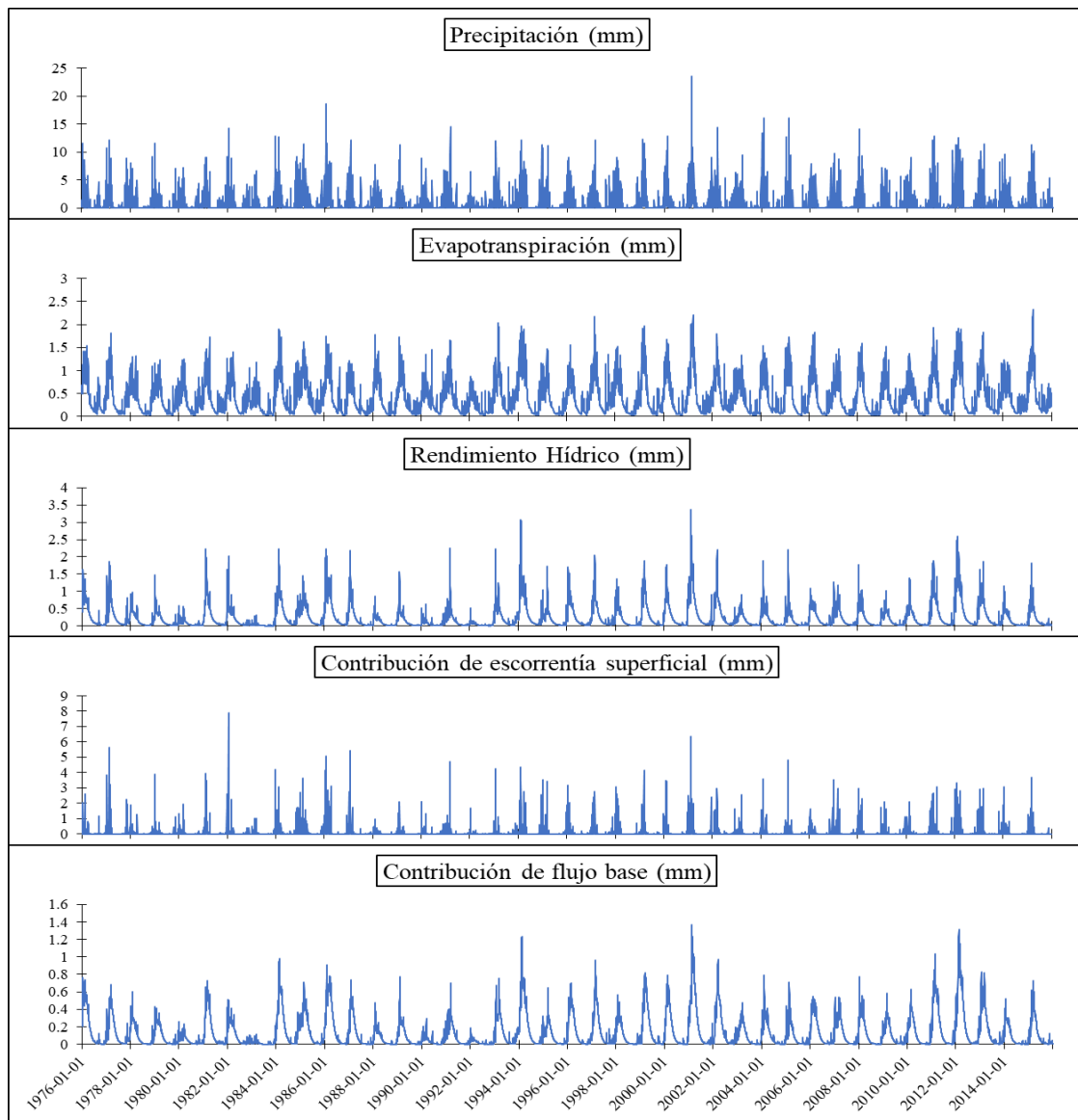


Figura 21: Evolución temporal promedio a escala diaria de los diferentes componentes del balance hídrico en la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

En la Figura 23 se observan los caudales de las subcuencas, elegidas para la evaluación mediante la disponibilidad hídrica en las zonas alta, media y baja. Mediante los estadísticos presentes en la Tabla 17, observamos que los valores de la media y mediana son mayores en la cuenca baja, evidentemente debido a que acumula todo el caudal proveniente de la zona media y alta, de manera muy cercana se encuentran los valores del caudal a la salida de la subcuenca 28 ubicada en la zona media de la cuenca en estudio, como se muestra en la Figura 22, aproximadamente a la altura de la estación meteorológica Quinistaquillas, esta acumula el volumen proveniente de los ríos Vizcachas, Chilota y Coralaque, por mencionar a los más importantes, además de los provenientes de la denominada zona alta que tienen su salida en

la subcuenca 11. Mientras que en menor medida se presentan los valores de la media y mediana para la zona alta correspondientes a 12.4 y 6.2 respectivamente, subcuenca que recibe el caudal de los ríos Ichuña y Paltiture. En la Figura 23, se muestran los caudales a escala mensual de las tres zonas descritas. Los hidrogramas de los caudales simulados (periodo 1976-2015) a escala diaria se encuentran en el Anexo 3 del presente estudio.

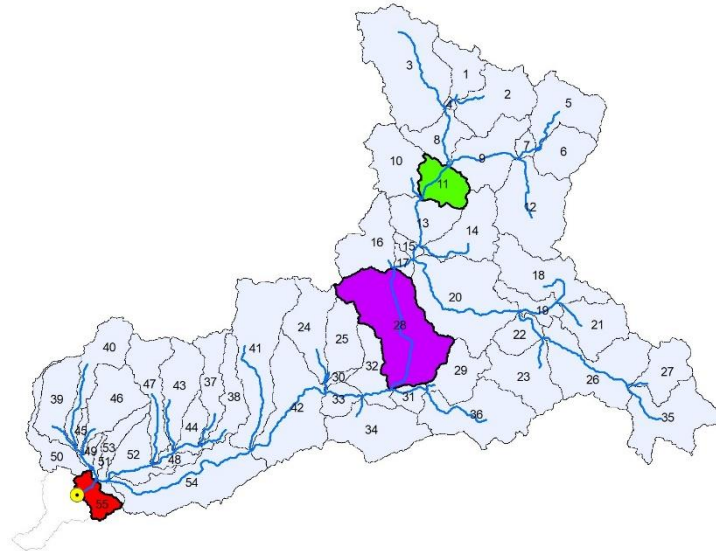


Figura 22: Ubicación de las subcuencas de análisis (subcuenca 11: zona alta, subcuenca 28: zona media, subcuenca 55: zona baja)

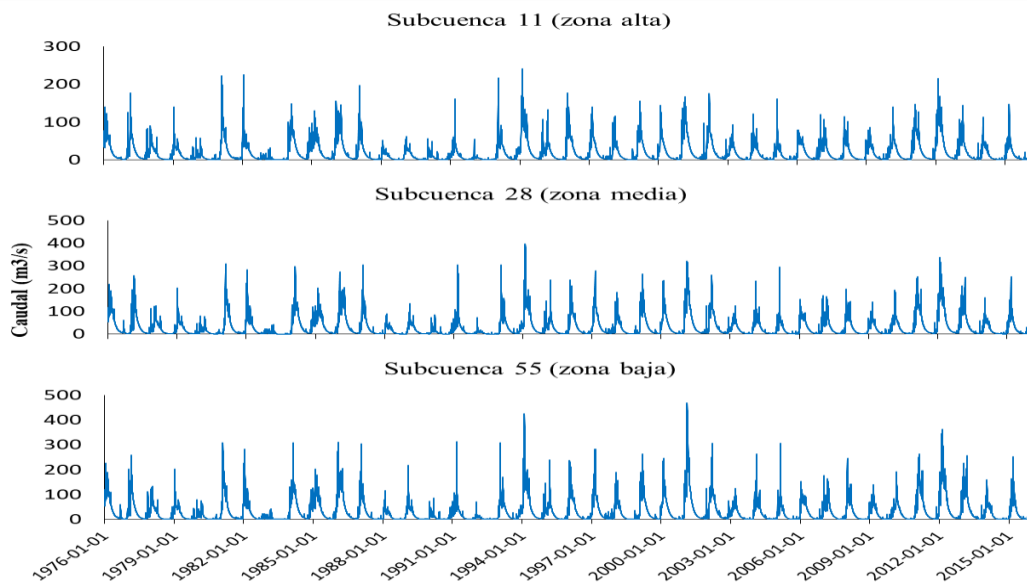


Figura 23: Evolución temporal del caudal simulado a escala diaria en las tres zonas de la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

Tabla 17: Estadísticos generales de caudales diarios de las subcuencas ubicadas en las zonas: alta, media y baja de la cuenca del río Tambo

Estadístico	Sub. 55 (Zona baja)	Sub. 28 (Zona media)	Sub. 11 (Zona alta)
Mín.	2.1	1.95	0.52
1er Qu.	9.36	9.12	3.88
Mediana	12.9	11.3	7.1
Media	32.93	31.34	17.51
3er Qu.	26.8	26.3	12.4
Máx.	437	428	362

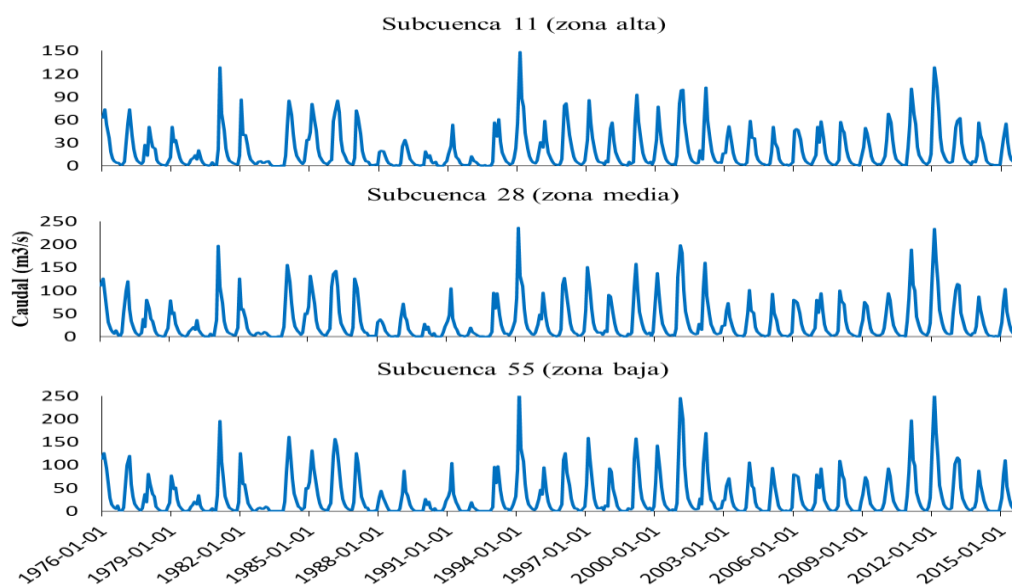


Figura 24: Evolución temporal del caudal simulado a escala mensual en las tres zonas de la cuenca del río Tambo. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

Así mismo se obtuvieron los estadísticos generales para cada una de las 55 subcuencas delimitadas, que se aprecian en el Anexo 4 del presente estudio, muchas de ellas presentan valores mínimos cercanos a 0, ya que se tratan de quebradas ubicadas en la zona baja, como las subcuencas 45, 46, 47, 49, 50 y 51.

A continuación en la Figura 25, se muestran los caudales de salida de cada subcuenca para cada año que presenta mayores valores de avenidas en cada periodo decanal de análisis. Se aprecian algunas subcuencas las cuales transportan gran cantidad de caudales (subcuencas 55, 54, 42, 28) y que probablemente hayan causado inundaciones, no solo en la parte final de la cuenca, sino también en la zonas altas, tal y como indican los estudios realizados por

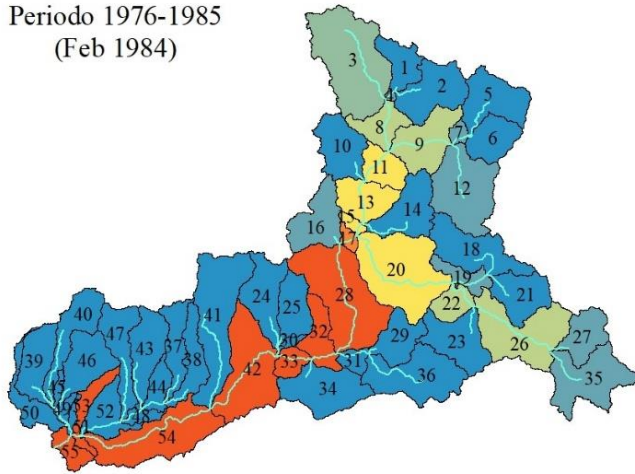
el INGEMMET en el año 2012, “Estudio hidrogeológico en la cuenca del río Tambo”, donde identificó diferentes zonas vulnerables en la zona de estudio; también encontramos las intercuenas que acumulan el caudal de varias subcuencas pero que sin embargo poseen un área pequeña, ya que solo dan el paso a dichos caudales (subcuencas 7, 4, 53).

Es notoria la diferencia de caudales que presenta el mes de febrero de 1984 con respecto a los demás años analizados, es el año que presentó mayor caudal en el periodo 1976 – 1985, pero que sin embargo sus caudales más altos están entre 110 m³/s y 140 m³/s, mientras que en los demás años se encuentran entre 140 m³/s y 180 m³/s.

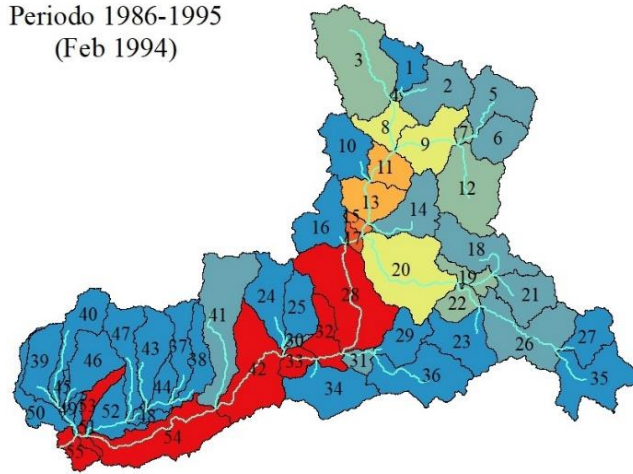
Es evidente también que los años 1994 y 2012 son los que presentan mayores caudales, debido a que las subcuencas ubicadas en lo más alto presentan salidas entre 5 m³/s y 10 m³/s (subcuencas 2, 5, 6, 14, 18, 21 para el año 1994, subcuencas 2, 5, 12, 14, 16, 18, 21, 35 para el año 2012), a diferencia del año 1984 que tiene valores menores a 5 m³/s, cabe mencionar que el año 2001 presenta también valores entre 5 m³/s y 10 m³/s en algunas subcuencas de la parte alta, pero estos alcanzan menores volúmenes ya que se puede apreciar que en la subcuenca 28 se tiene un gasto entre 110 m³/s y 140 m³/s, mientras que los años 1994 y 2012 están entre 140 m³/s y 180 m³/s. Es importante mencionar que estos valores corresponden a un promedio mensual, por lo que los valores diarios obtenidos y/o registrados pueden ser mayores.

Se observa pues, que en el caso de la cuenca en estudio, es a partir de la zona media (subcuenca 28) donde empiezan a acumularse los grandes caudales provenientes de las zonas altas, hasta llegar a la subcuenca 55, que es donde llega el caudal de toda la cuenca, estos valores oscilan entre 140 m³/s y 180 m³/s, salvo el año 1984 que solo llegó a caudales entre 110 m³/s y 140 m³/s como se mencionó anteriormente.

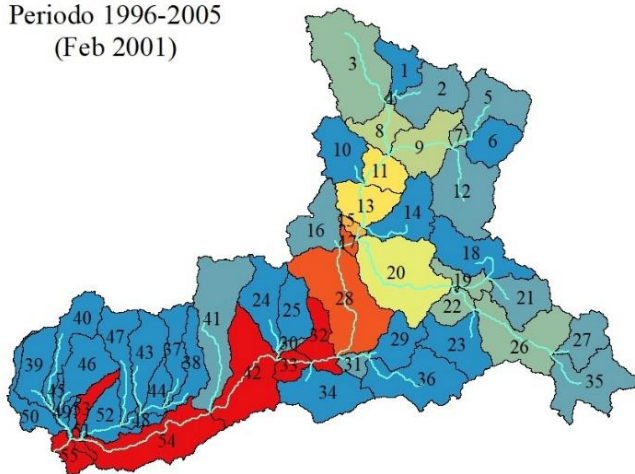
Periodo 1976-1985
(Feb 1984)



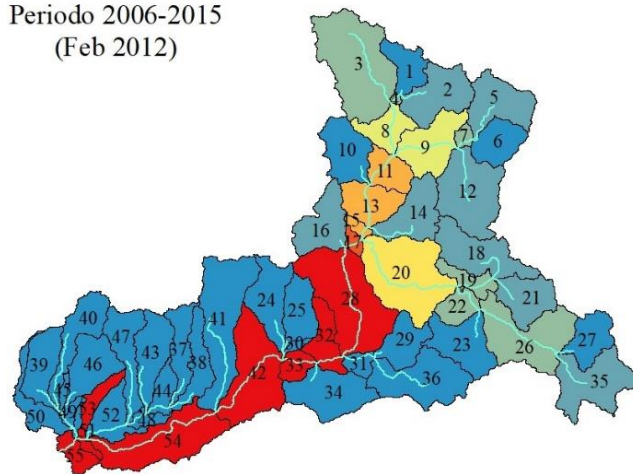
Periodo 1986-1995
(Feb 1994)



Periodo 1996-2005
(Feb 2001)



Periodo 2006-2015
(Feb 2012)



Caudal (m3/s)

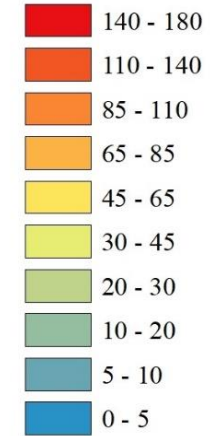


Figura 25: Caudales de salida promedio (m3/s) a nivel de subcuencas en los diferentes periodos de análisis

4.1.3. Disponibilidad hídrica

En la Figura 26 se muestra la oferta hídrica en la estación Santa Rosa en los distintos niveles de persistencia: 50%, 75% y 95%, con sus respectivos valores en la Tabla 18. Así mismo se elaboraron las curvas de variación de la probabilidad de excedencia para la cuenca alta, media y baja se muestra en la Figura 27, estas sirvieron como partida para el cálculo del análisis de persistencia al 75% (caudal mínimo probable para agricultura) presente en la Figura 28, con el objetivo de determinar la disponibilidad hídrica en las tres zonas de la cuenca en estudio. El caudal tiende a elevarse desde el mes de diciembre hasta el mes de marzo, periodo donde se presentan las mayores precipitaciones, a partir del mes de abril este decae presentando los niveles más bajos entre mayo y octubre, para nuevamente empezar a crecer en noviembre.

En la zona alta de la cuenca, para el periodo 1996 - 2005, entre los meses de diciembre y marzo, el caudal varía de 5.84 m³/s a 44.15 m³/s ($\Delta Q = 38.31 \text{ m}^3/\text{s}$), una diferencia notoria con respecto al periodo 1986 - 1995, donde el caudal varía de 4.43 m³/s a 14.32 m³/s ($\Delta Q = 9.89 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo total 1976 - 2015 el caudal oscila entre 6.14 m³/s a 27.67 m³/s ($\Delta Q = 21.53 \text{ m}^3/\text{s}$).

Entre los meses de abril y julio del periodo 1996 - 2005, el caudal varía de 22.96 m³/s a 6.56 m³/s ($\Delta Q = -16.4 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo 1986 - 1995 varía de 8.72 m³/s a 3.52 m³/s ($\Delta Q = -5.2 \text{ m}^3/\text{s}$), en el periodo total 1976 - 2015 el caudal va desde 16.16 m³/s a 5.03 m³/s ($\Delta Q = -11.13 \text{ m}^3/\text{s}$). En cuanto a los caudales que van de agosto a noviembre, se aprecia que en el periodo 1996 - 2005 este varía de 4.65 m³/s a 3.32 m³/s ($\Delta Q = -1.33 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo 1986 - 1995 el caudal oscila entre 3.04 m³/s a 2.99 m³/s ($\Delta Q = -0.05 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo total 1976 - 2015 varía de 3.82 m³/s a 3.21 m³/s ($\Delta Q = -0.61 \text{ m}^3/\text{s}$).

En la zona media de la cuenca, para el periodo 1996 - 2005, entre los meses de diciembre y marzo el caudal varía de 12.26 m³/s a 73.27 m³/s ($\Delta Q = 61.01 \text{ m}^3/\text{s}$), nuevamente una diferencia notoria con respecto al periodo 1986 - 1995, donde el caudal varía de 8.32 m³/s a 24.93 m³/s ($\Delta Q = 16.61 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo total 1976 - 2015 el caudal oscila entre 11.09 m³/s a 45.25 m³/s ($\Delta Q = 34.16 \text{ m}^3/\text{s}$). Entre los meses de abril y julio del periodo 1996 - 2005, el caudal varía de 32.35 m³/s a 10.27 m³/s ($\Delta Q = -22.08 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo 1986 - 1995 varía de 16.2 m³/s a 6.62 m³/s ($\Delta Q = -9.58 \text{ m}^3/\text{s}$), en el periodo total 1976 - 2015 el caudal va desde 26.94 m³/s a 8.8 m³/s ($\Delta Q = -18.14 \text{ m}^3/\text{s}$). En cuanto a los

caudales que van de agosto a noviembre, se aprecia que en el periodo 1996 – 2005 este varía de 8.03 m³/s a 6.41 m³/s ($\Delta Q = -1.62 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo 1986 – 1995 el caudal oscila entre 5.82 m³/s a 6.05 m³/s ($\Delta Q = 0.23 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo total 1976 – 2015 varia de 6.95 m³/s a 6.04 m³/s ($\Delta Q = -0.91 \text{ m}^3/\text{s}$).

En la zona baja de la cuenca, para el periodo 1996 - 2005, entre los meses de diciembre y marzo el caudal varia de 12.54 m³/s a 73.49 m³/s ($\Delta Q = 60.95 \text{ m}^3/\text{s}$), nuevamente se presenta una diferencia notoria con respecto al periodo 1986 – 1995, donde el caudal varia de 8.46 m³/s a 23.83 m³/s ($\Delta Q = 15.37 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo total 1976 – 2015 el caudal oscila entre 11.28 m³/s a 44.13 m³/s ($\Delta Q = 32.85 \text{ m}^3/\text{s}$).

Entre los meses de abril y julio del periodo 1996 – 2005, el caudal varia de 30.84 m³/s a 9.4 m³/s ($\Delta Q = -21.44 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo 1986 – 1995 varia de 14.66 m³/s a 6.27 m³/s ($\Delta Q = -8.39 \text{ m}^3/\text{s}$), en el periodo total 1976 – 2015 el caudal va desde 25.35 m³/s a 7.9 m³/s ($\Delta Q = -17.45 \text{ m}^3/\text{s}$). En cuanto a los caudales que van de agosto a noviembre, se aprecia que en el periodo 1996 – 2005 este varía de 7.3 m³/s a 6.47 m³/s ($\Delta Q = -0.83 \text{ m}^3/\text{s}$), para el periodo 1986 – 1995 el caudal oscila entre 6.15 m³/s a 6.44 m³/s ($\Delta Q = 0.29 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que para el periodo total 1976 – 2015 varia de 6.48 m³/s a 6.54 m³/s ($\Delta Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$).

Mediante la comparación de los caudales al 75% de persistencia en la parte alta de la cuenca para los meses entre diciembre y marzo, se observa que el periodo con mayor presencia de lluvia y por lo tanto de caudal es el de 1996 – 2005, presentando una variación de casi 38 m³/s, gran diferencia con respecto al periodo 1986 – 1995 cuya variación de caudal fue de 10 m³/s, siendo el periodo con menor registro de los cuatro en estudio. Para el periodo 1976 – 2015 se obtuvo una variación de 21.5 m³/s, de esta manera dependiendo de la época del año, es decir durante el periodo seco o de lluvias, el caudal promedio al 75% de persistencia puede variar entre -44.5% y +47%.

En las zona media de la cuenca, para los meses entre diciembre y marzo, se observa que el periodo con mayor presencia de lluvia y caudal (1996 – 2005), presenta una variación de aproximadamente 61 m³/s, gran diferencia con respecto al periodo 1986 – 1995 cuya

variación de caudal fue de 16.6 m³/s, siendo el periodo con menor registro de los cuatro en estudio. Para el periodo 1976 – 2015 se obtuvo una variación de 34 m³/s, de esta manera dependiendo de la época del año, durante el periodo seco o de lluvias, el caudal promedio al 75% de persistencia puede variar entre -41% y +51.8%.

En las zona baja de la cuenca, para los meses entre diciembre y marzo, se observa que el periodo con mayor presencia de lluvia y caudal (1996 – 2005), presenta una variación de aproximadamente 61 m³/s, gran diferencia con respecto al periodo 1986 – 1995 cuya variación de caudal fue de 15 m³/s, siendo el periodo con menor registro de los cuatro en estudio. Para el periodo 1976 – 2015 se obtuvo una variación de 33 m³/s, de esta manera dependiendo de la época del año, durante el periodo seco o de lluvias, el caudal promedio al 75% de persistencia puede variar entre -41.8% y +55.3%.

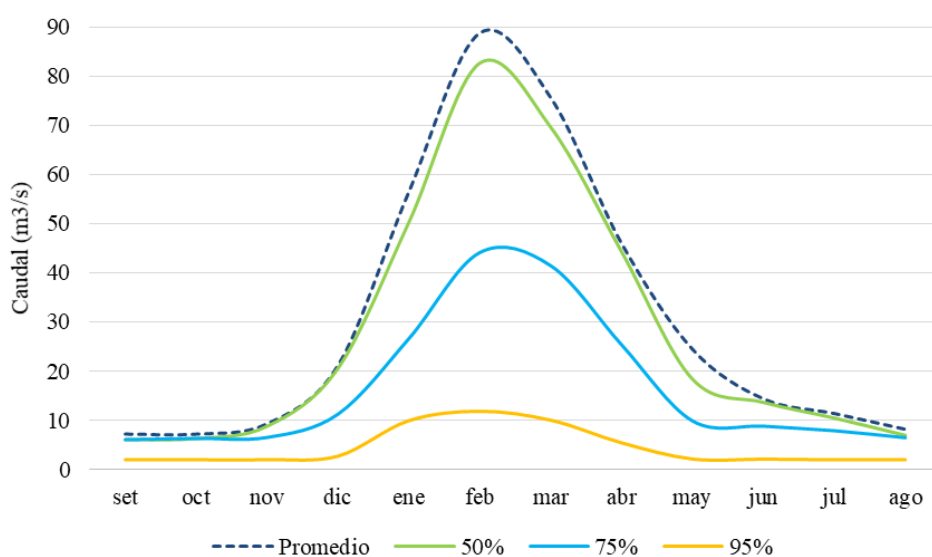
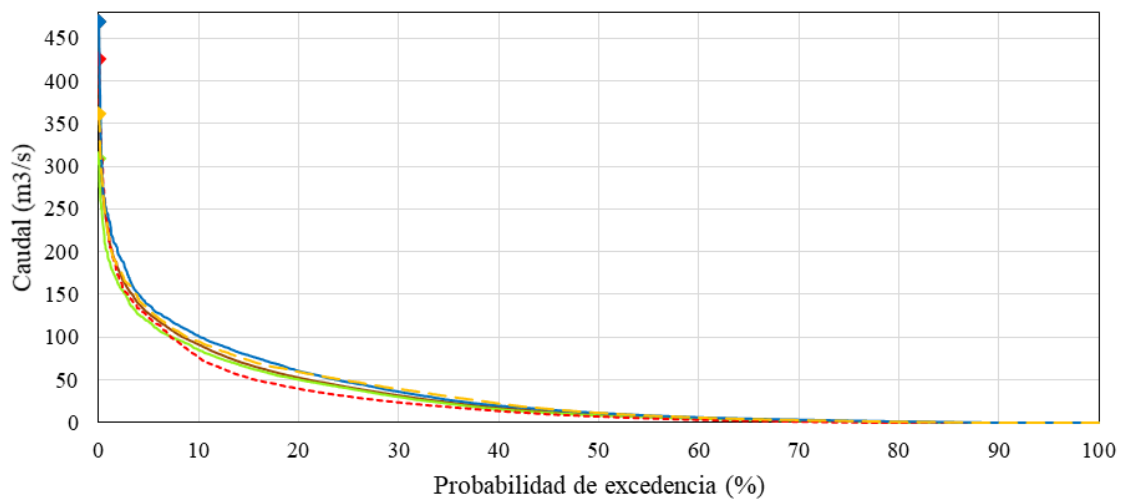
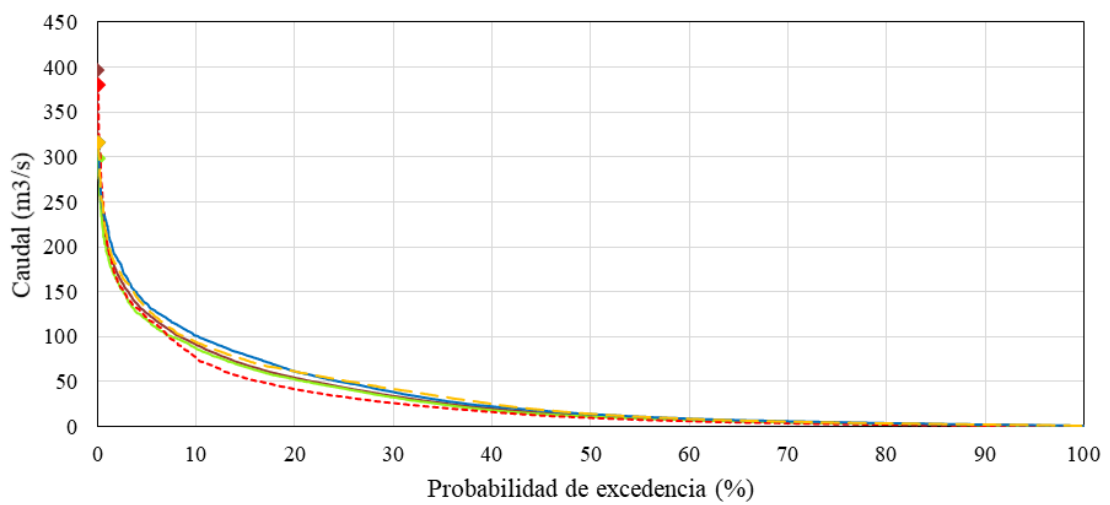
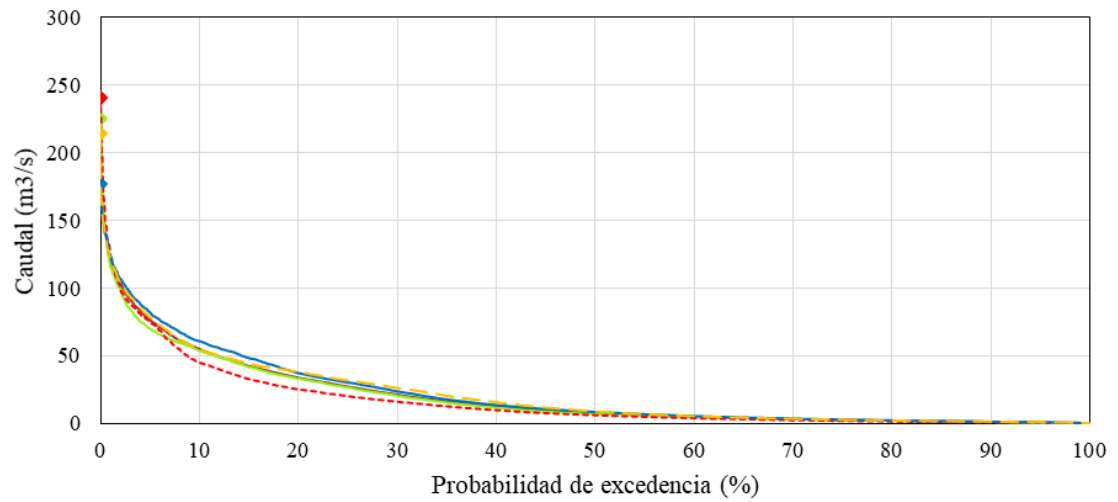


Figura 26: Niveles de persistencia de la oferta hídrica en la estación de aforo Santa Rosa

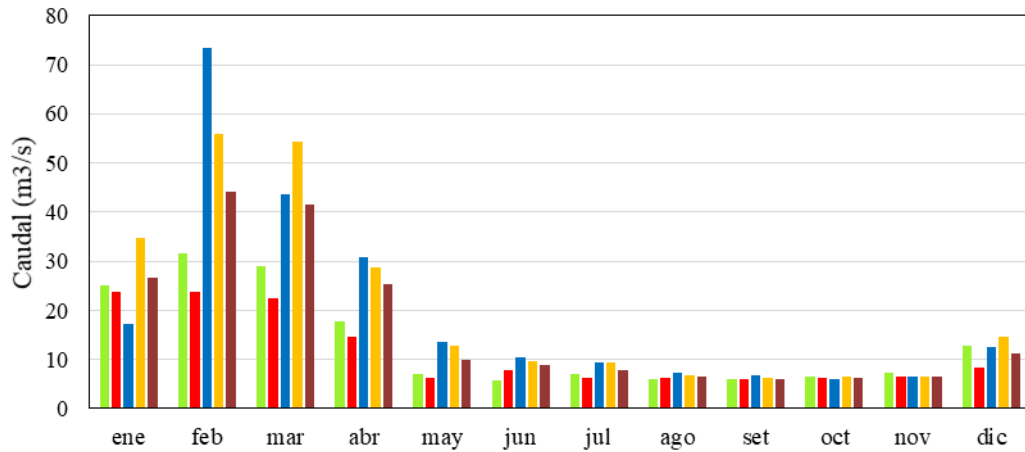
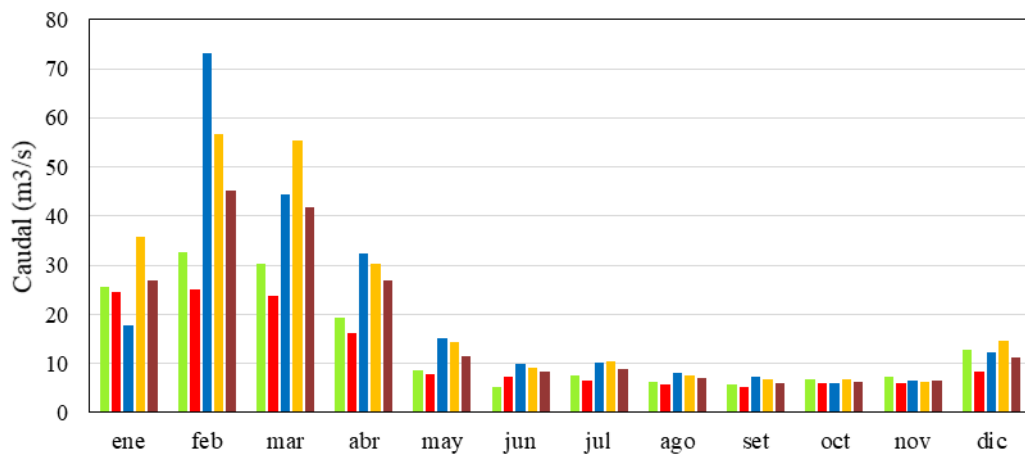
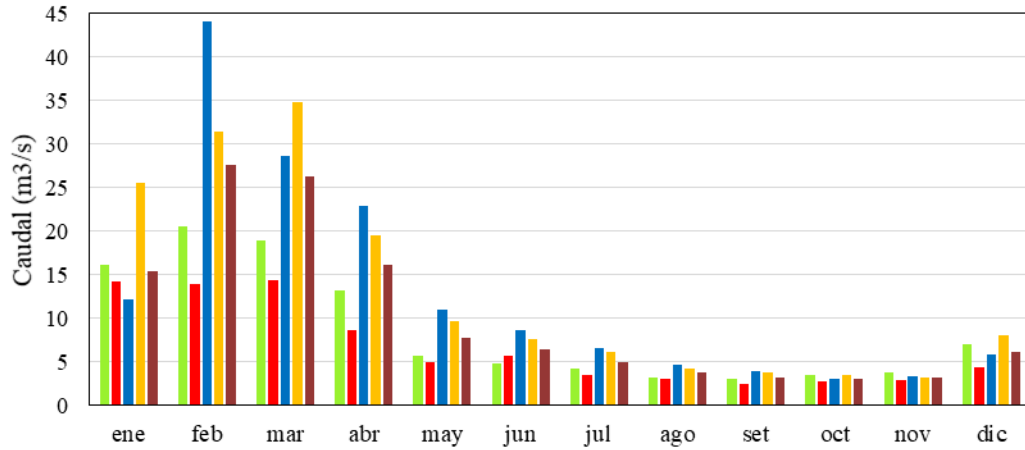
Tabla 18: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales diarios de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
Promedio	7.12	7.10	9.20	21.10	56.44	88.78	75.61	45.92	24.38	14.30	11.30	8.10
50%	6.08	6.30	8.81	20.61	50.31	82.65	69.58	44.25	18.36	13.67	10.47	6.97
75%	6.08	6.34	6.54	11.28	26.65	44.13	41.44	25.35	9.88	8.83	7.90	6.48
95%	2.00	2.00	2.00	2.74	9.96	11.86	10.04	5.44	2.14	2.12	2.00	2.00



- ◆ Periodo (1976-2015)
- ◆ Periodo (1976-1985)
- ◆ Periodo (1986-1995)
- ◆ Periodo (1996-2005)
- ◆ Periodo (2006-2015)

Figura 27: Variación de la probabilidad de excedencia de caudales diarios de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015



■ Periodo (1976-1985)
 ■ Periodo (1986-1995)
 ■ Periodo (1996-2005)
■ Periodo (2006-2015)
 ■ Periodo (1976-2015)

Figura 28: Análisis de persistencia al 75% de caudales de las zonas: alta, media y baja de la cuenca. Período 01/01/1976 – 31/12/2015

4.1.4. Balance hídrico de oferta y demanda

El balance hídrico se realizó en la zona baja de la cuenca (ver Figura 29), para esto se utilizó información de la demanda hídrica del estudio de factibilidad “Afianzamiento Hídrico en el Valle de Tambo” elaborado en el año 2005 por el Ministerio de Agricultura a través de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) ex INRENA.

Los resultados al 75% de persistencia correspondiente a la oferta hídrica en el presente estudio para el periodo 1976 - 2015, muestran un máximo de 111.0 hm^3 y un mínimo de 15.75 hm^3 , en los meses de febrero y setiembre respectivamente, mientras que el volumen anual alcanzado se estimó en 526.42 hm^3 (ver Figura 30).

En cuanto a la demanda hídrica, es importante mencionar, que prácticamente la totalidad de esta demanda es destinada al uso agrario, por lo que el uso no agrario (poblacional, industrial, piscícola) representa un mínimo porcentaje. Observamos pues, que son los meses de enero, febrero y marzo, los que presentan mayor demanda, estas corresponden a 35.13 hm^3 , 34.74 hm^3 , 36.94 hm^3 respectivamente, la menor demanda se da en el mes de junio, con un valor de 12.06 hm^3 , este valor aumenta en el mes de julio y se mantiene en niveles muy cercanos hasta el mes de noviembre, para nuevamente empezar a incrementarse en diciembre, el volumen anual alcanzado es de 264.80 hm^3 (ver Tabla 19).

En lo concerniente al excedente y déficit hídrico, el presente estudio no presenta déficit en ningún mes del año, por lo que se puede afirmar que el excedente anual es de 261.62 hm^3 ; en cuanto al excedente, este presenta su mayor valor en febrero con 75.83 hm^3 y el mínimo en setiembre con 0.61 hm^3 , es aquí donde se deben tomar con precaución los valores ubicados entre los meses de agosto y octubre, ya que probablemente la demanda con el pasar de los años se haya incrementado, y en caso se produzca una ampliación de la frontera agrícola en la zona baja de la cuenca, se podría llegar a un déficit en dichos meses, debiendo tomar otras medidas para contrarrestar la posible falta de agua.

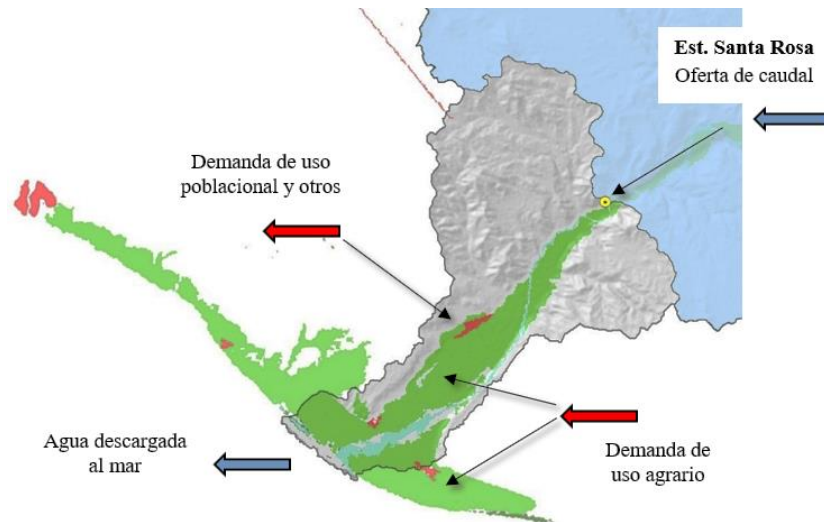


Figura 29: Punto de control para la determinación del balance hídrico

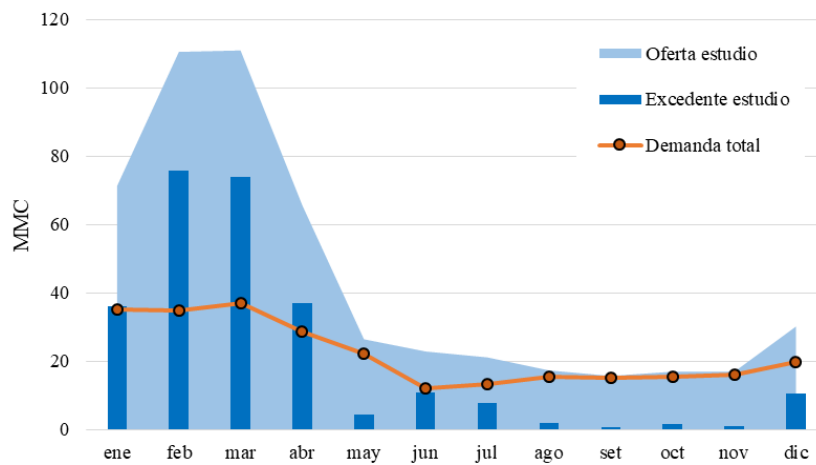


Figura 30: Balance hídrico de oferta y demanda en la cuenca del río Tambo periodo 1976 – 2015

Tabla 19: Balance hídrico de oferta y demanda

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Total
Demanda total (hm3)	35.13	34.74	36.94	28.77	22.10	12.06	13.27	15.56	15.14	15.47	15.96	19.66	264.80
Demanda total (m3/s)	13.12	13.86	13.79	11.10	8.25	4.65	4.95	5.81	5.84	5.78	6.16	7.34	100.65
Oferta (hm3)	71.38	110.57	111.00	65.70	26.48	22.89	21.17	17.35	15.75	16.99	16.95	30.21	526.42
Oferta (m3/s)	26.65	44.13	41.44	25.35	9.88	8.83	7.90	6.48	6.08	6.34	6.54	11.28	200.90
Excedente (hm3)	36.25	75.83	74.06	36.93	4.38	10.83	7.90	1.79	0.61	1.52	0.99	10.55	261.62

4.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.2.1. Variabilidad climática

Mediante el uso de la herramienta RCLimindex se obtuvieron los 27 índices que describen la variabilidad climática en las tres zonas de la cuenca, para lo cual se utilizaron las estaciones Imata (Zona alta), Ubinas (Zona media) y Pampa Blanca (Zona baja) presentes en la Tabla 20.

Tabla 20: Índices de temperatura (verde) y precipitación (azul) para el periodo 1976 – 2015, donde P_Value es el nivel de seguridad estadística para el análisis y la pendiente de la curva de ajuste que indica la magnitud del cambio por década

Índices	Descripción	Imata		Ubinas		Pampa Blanca	
		P_Value	pendiente	P_Value	pendiente	P_Value	pendiente
SU25	Días de T máx. superior a 25°C	0.723	-0.002	0.066	0.017	0.009	0.219
ID0	Días de T máx. muy fría < 0°C	0.053	0.006	0.899	0	0.326	0.013
TR20	Noches de T máx. superior a 20°C	0.539	0.006	0.184	0.007	0.994	0
FD0	Días de frío de T min inferior a 0°C	0.11	-0.003	0.418	-0.004	0.615	0.014
GSL	Duración de la estación de cultivo	0.374	0.494	0.645	-0.003	0.645	-0.003
TXX	Máxima temperatura máxima registrada en cada mes	0.143	0.015	0.004	0.032	0	0.06
TXN	Mínima temperatura máxima	0.062	0.017	0.045	0.026	0.412	0.009
TNX	Máxima temperatura mínima registrada en cada mes	0.122	0.015	0.372	0.011	0.003	0.029
TNN	Mínima temperatura mínima	0	0.096	0.002	0.042	0.403	0.017
TX10P	Días fríos	0	-0.351	0.007	-0.277	0.04	-0.207
TX90P	Días calientes	0.233	0.161	0	0.468	0	0.852
TN10P	Noches frías	0	-0.472	0	-0.387	0.068	-0.192
TN90P	Noches calientes	0.016	0.235	0.008	0.287	0.379	0.209
WSDI	Cantidad de periodos de 6 días de temperaturas altas	0.32	-0.176	0.03	0.21	0.005	0.783
CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	0.005	-0.473	0.062	-0.224	0.574	0.051
DTR	Rango diario de temperatura (máxima menos mínima)	0.184	-0.022	0.6	0.004	0.002	0.02
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	0.086	0.213	0.14	-0.139	0.07	0.016
RX5day	Cantidad máxima de precipitación en cinco días	0.192	0.337	0.229	0.253	0.127	0.019
SDII	Índice simple de intensidad diaria	0.133	0.02	0.571	0.009	0.055	0.012
R10mm	Número de días con precipitación intensa	0.615	0.041	0.076	0.116	NaN	0
R20mm	Número de días con precipitación muy intensa	0.963	0.001	0.96	0.001	NaN	0
R25mm	Número de días sobre 25mm	0.086	0.039	0.848	-0.002	0.298	0.004
CDD	Días secos consecutivos	0.64	0.262	0.353	-0.622	0.96	0.801
CWD	Días húmedos consecutivos	0.293	-0.058	0.534	0.025	0.636	0.004
R95p	Días muy húmedos	0.489	0.636	0.403	0.486	0.247	0.006
R99p	Días extremadamente húmedos	0.402	0.453	0.698	-0.117	NaN	0
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	0.425	1.565	0.133	2.287	0.479	0.014

- Alta probabilidad de ocurrencia. Mayor al 90%.
- Muy alta probabilidad de ocurrencia. Mayor al 99%.

Como se observa en la Tabla 20, las tres estaciones presentan índices con muy alta probabilidad de ocurrencia mayor al 99% en cuanto a temperatura, mas no en precipitación, por lo que se puede considerar que no existe variación significativa a lo largo de los años con respecto a las precipitaciones en las zonas cercanas a las estaciones elegidas para este análisis.

Se pueden observar claramente las tendencias para la estación Imata en cada uno de los índices de la Figura 31, positiva en cuanto temperatura mínima de cada mes, mostrando que las temperaturas se vienen incrementando a través de los años ($0.96^{\circ}\text{C}/\text{década}$); por otro lado, negativas con respecto al porcentaje de días fríos (-3.5 días/década), porcentaje de noches frías (-4.7 días/década) y duración de periodos fríos (-4.7 días/década).

En cuanto a la estación Ubinas, en la Figura 32, se observan tendencias positivas con respecto a temperaturas máximas ($0.32^{\circ}\text{C}/\text{década}$), temperaturas mínimas ($0.42^{\circ}\text{C}/\text{década}$) de cada mes, porcentaje de días calientes (4.7 días/década) y porcentaje de noches calientes (2.9 días/década), mostrando también que las temperaturas se vienen incrementando a través del tiempo; las tendencias negativas las presentan el porcentaje de días fríos (-2.7 días/década) y porcentaje de noches frías (-3.9 días/década).

Por otro lado, en la estación Pampa Blanca, todas las tendencias de los índices de la Figura 33, se muestran positivas, días de temperaturas máximas superiores a 31.6°C (2.2 días/década), temperaturas máximas ($0.6^{\circ}\text{C}/\text{década}$), temperaturas mínimas ($0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$) de cada mes, porcentaje de días calientes (8.5 días/década), periodos de seis días seguidos de temperaturas altas (7.8 días/década), diferencia entre temperatura máxima y mínima ($0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$).

Como se mencionó anteriormente, las tres estaciones analizadas muestran tendencias al calentamiento, ya sea por el aumento constante de las temperaturas máximas y mínimas y/o también por la reducción de los periodos fríos a través de los años, dichas magnitudes se muestran a modo de resumen en la Tabla 21.

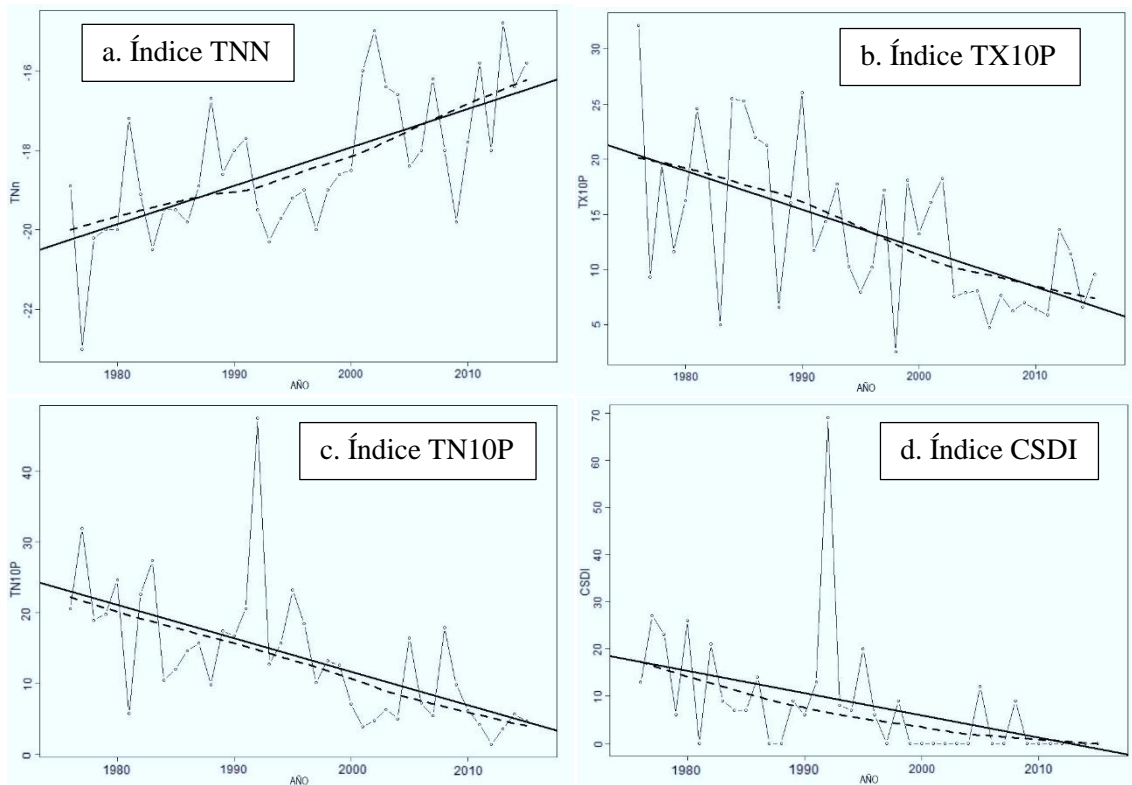


Figura 31: Índices de temperatura estación Imata periodo 1976 – 2015 con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%

Nota. a. Índice TNN (Mínimo valor de temperatura identificado en la temperatura mínima diaria por mes) b. Índice TX10P (Porcentaje de días con temperatura máxima menor al Percentil 10 – Días fríos) c. Índice TN10P (Porcentaje de días con temperatura mínima menor al Percentil 10 - Noches frías) d. Índice CSDI (Conteo anual de días con un mínimo de 6 días consecutivos en que la temperatura mínima es menor al percentil 10).

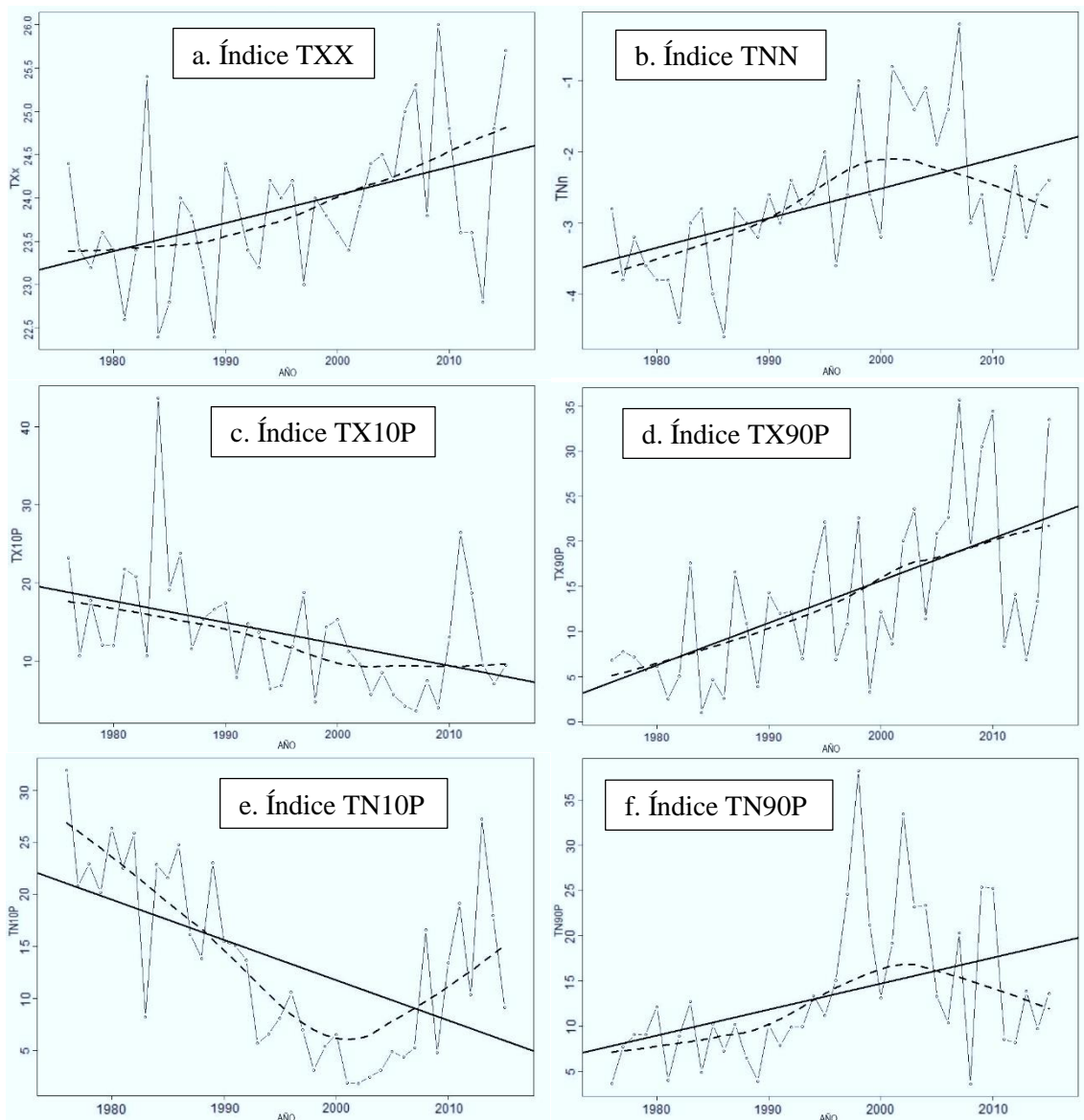


Figura 32: Índices de temperatura estación Ubinas, periodo 1976 – 2015, con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%

Nota. a. Índice TXX (Máximo valor de temperatura identificado en la temperatura máxima diaria por mes) b. Índice TNN (Mínimo valor de temperatura identificado en la temperatura mínima diaria por mes) c. Índice TX10P (Porcentaje de días con temperatura máxima menor al Percentil 10 – Días fríos) d. Índice TX90P (Porcentaje de días con temperatura máxima mayor al Percentil 90 – Días calientes) e. Índice TN10P (Porcentaje de días con temperatura mínima menor al Percentil 10 - Noches frías) f. Índice TN90P (Porcentaje de días con temperatura mínima mayor al Percentil 90 - Noches calientes).

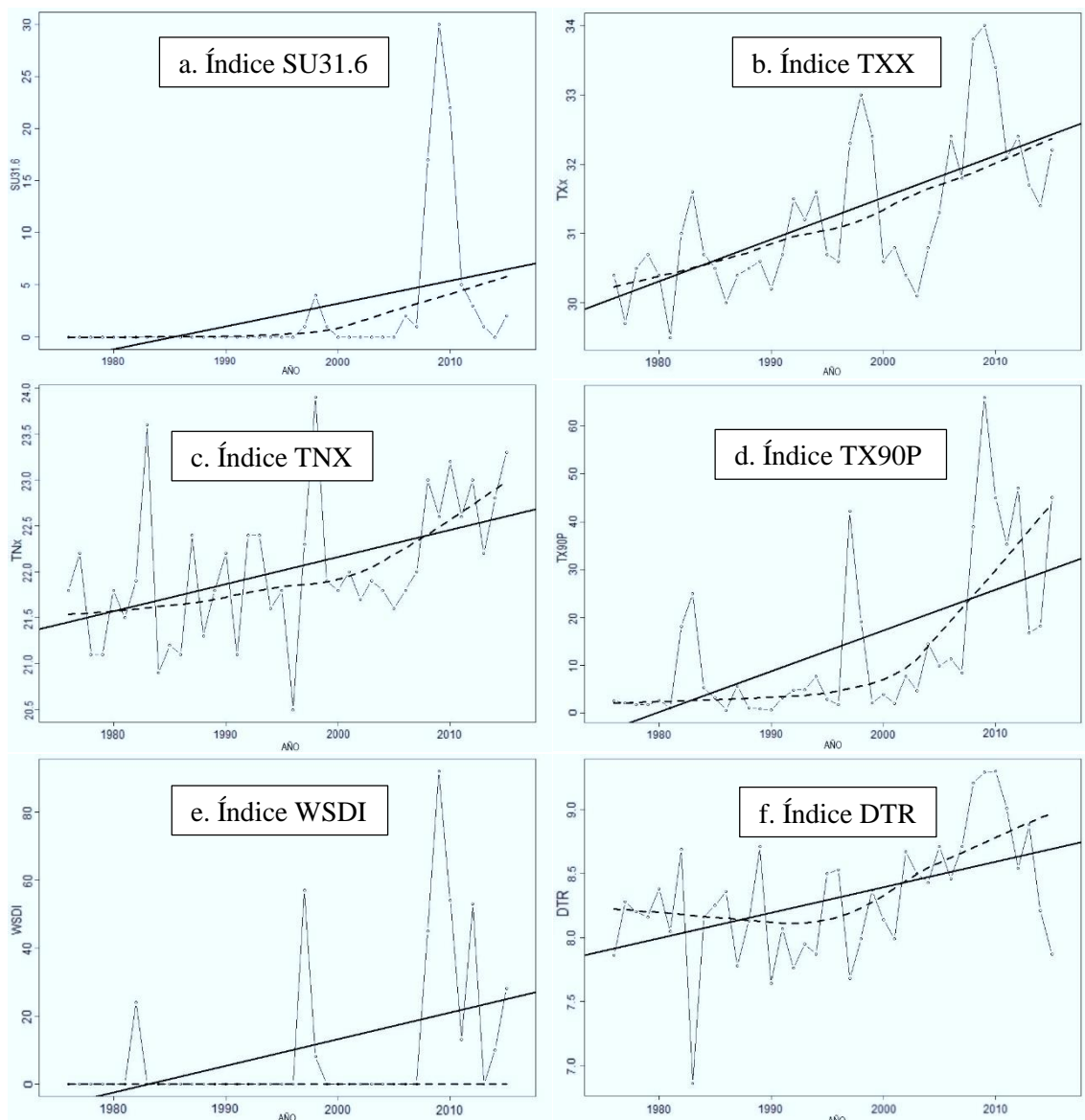


Figura 33: Índices de temperatura estación Pampa Blanca periodo 1976 – 2015 con probabilidad de ocurrencia mayor al 99%

Nota. a. Índice SU31.6 (Cantidad de días donde la temperatura es mayor a 31.6 °C durante un año) b. Índice TXX (Máximo valor de temperatura identificado en la temperatura máxima diaria por mes) c. Índice TNX (Mínimo valor de temperatura identificado en la temperatura máxima diaria por mes) d. Índice TX90P (Porcentaje de días con temperatura máxima mayor al Percentil 90) e. Índice WSDI (Conteo anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que la temperatura máxima es mayor al percentil 90) f. Índice DTR (Diferencia entre la temperatura máxima y mínima mensual promedio).

Tabla 21: Tendencias y magnitudes de cambio de los índices de temperatura de las estaciones Imata, Ubinas y Pampa Blanca para el periodo 1976 – 2015

Estación	Índice	Descripción	Tendencia	Magnitud de cambio
Imata	TNN	Mínima temperatura mínima	positiva	aumento decanal de 0.96 °C
	TX10P	Días fríos	negativa	descenso decanal de 3.5 días
	TN10P	Noches frías	negativa	descenso decanal de 4.7 días
	CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	negativa	descenso decanal de 4.7 días de periodos fríos
Ubinas	TXX	Máxima temperatura máxima registrada en cada mes	positiva	aumento decanal de 0.32 °C
	TNN	Mínima temperatura mínima	positiva	aumento decanal de 0.42 °C
	TX10P	Días fríos	negativa	descenso decanal de 2.7 días
	TX90P	Días calientes	positiva	aumento decanal de 4.7 días
	TN10P	Noches frías	negativa	descenso decanal de 3.9 días
	TN90P	Noches calientes	positiva	aumento decanal de 2.9 días
Pampa Blanca	SU31.6	Días de T máx. superior a 31.6°C	positiva	aumento decanal de 2.2 días
	TXX	Máxima temperatura máxima registrada en cada mes	positiva	aumento decanal de 0.6 °C
	TNX	Máxima temperatura mínima registrada en cada mes	positiva	aumento decanal de 0.29 °C
	TX90P	Días calientes	positiva	aumento decanal de 8.5 días
	WSDI	Cantidad de periodos de 6 días de temperaturas altas	positiva	aumento decanal de 7.8 días de periodos calientes
	DTR	Rango diario de temperatura (máxima menos mínima)	positiva	aumento decanal de 0.2 °C

Así mismo se elaboraron las curvas de densidad de probabilidad para las temperaturas máximas y mínimas de las tres estaciones analizadas como se muestra en las figuras 34 y 35, con la finalidad de observar el comportamiento decanal de los cuatro periodos comprendidos entre los años 1976 y 2015.

En la estación Imata (ver Figura 34) se observa claramente el desplazamiento de las curvas hacia la derecha, lo que indica un aumento decanal de las temperaturas máximas, teniendo al periodo 2006 - 2015 con los días y noches más calientes de las cuatro décadas. Lo mismo ocurre con la curva de temperatura mínima pero en menor medida, ésta también se desplaza hacia la derecha, comprobando así que tanto los días y noches frías en la zona, están aumentando su magnitud con el pasar del tiempo.

En cuanto a la estación Ubinas (ver Figura 35), el desplazamiento de las temperaturas

máximas y mínimas, se presenta de una forma leve, igualmente tienden al calentamiento, pero a diferencia del periodo de temperaturas máximas donde la década más caliente fue durante los años 2006 - 2015, la curva de temperaturas mínimas para el periodo 1996 – 2005 fue la que tuvo mayor tendencia al calentamiento.

Sobre la estación Pampa Blanca (ver Figura 35), aquí también se registra un mayor desplazamiento de la curva de temperaturas máximas con respecto a las mínimas, siendo el periodo 2006 - 2015 donde se registran los mayores valores de temperatura, demostrando así que los días y noches calientes tienen una mayor magnitud al cambio decenal en comparación con los días y noches frías.

En base a estos resultados de las gráficas de densidad de probabilidad, podemos inferir que la evaluación de la variabilidad climática, desarrollada mediante la herramienta RClimdex, es confiable, tal y como indican los gráficos de los índices calculados previamente.

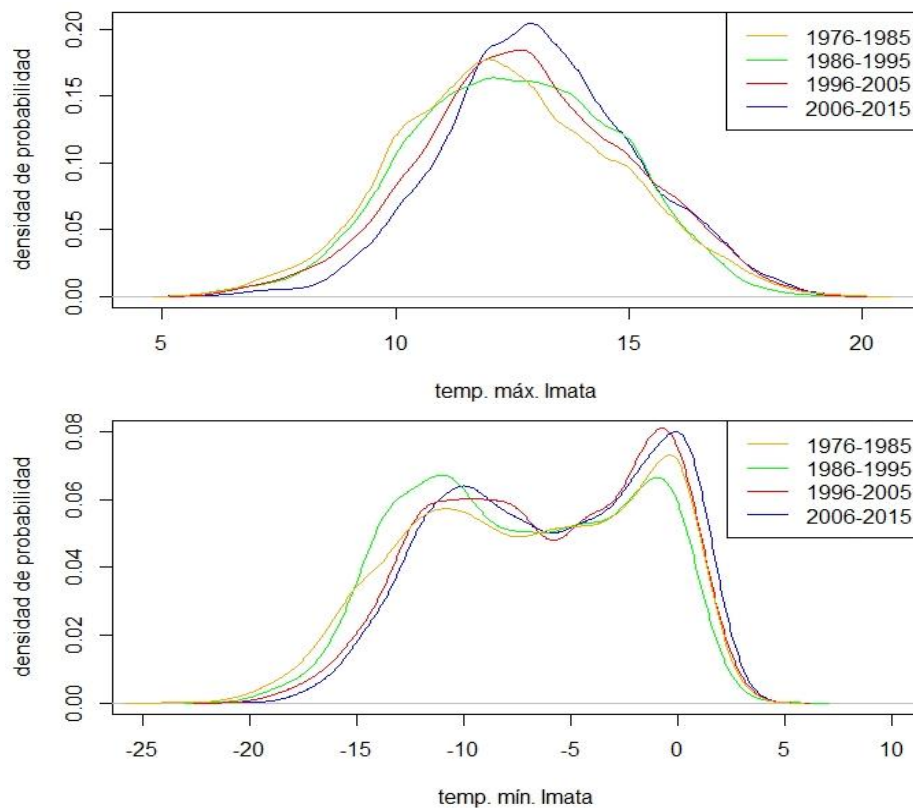


Figura 34: Curvas de densidad de probabilidad decenal de temperaturas máximas y mínimas diarias de la estación Imata (zona alta). Periodo 1976 – 2015

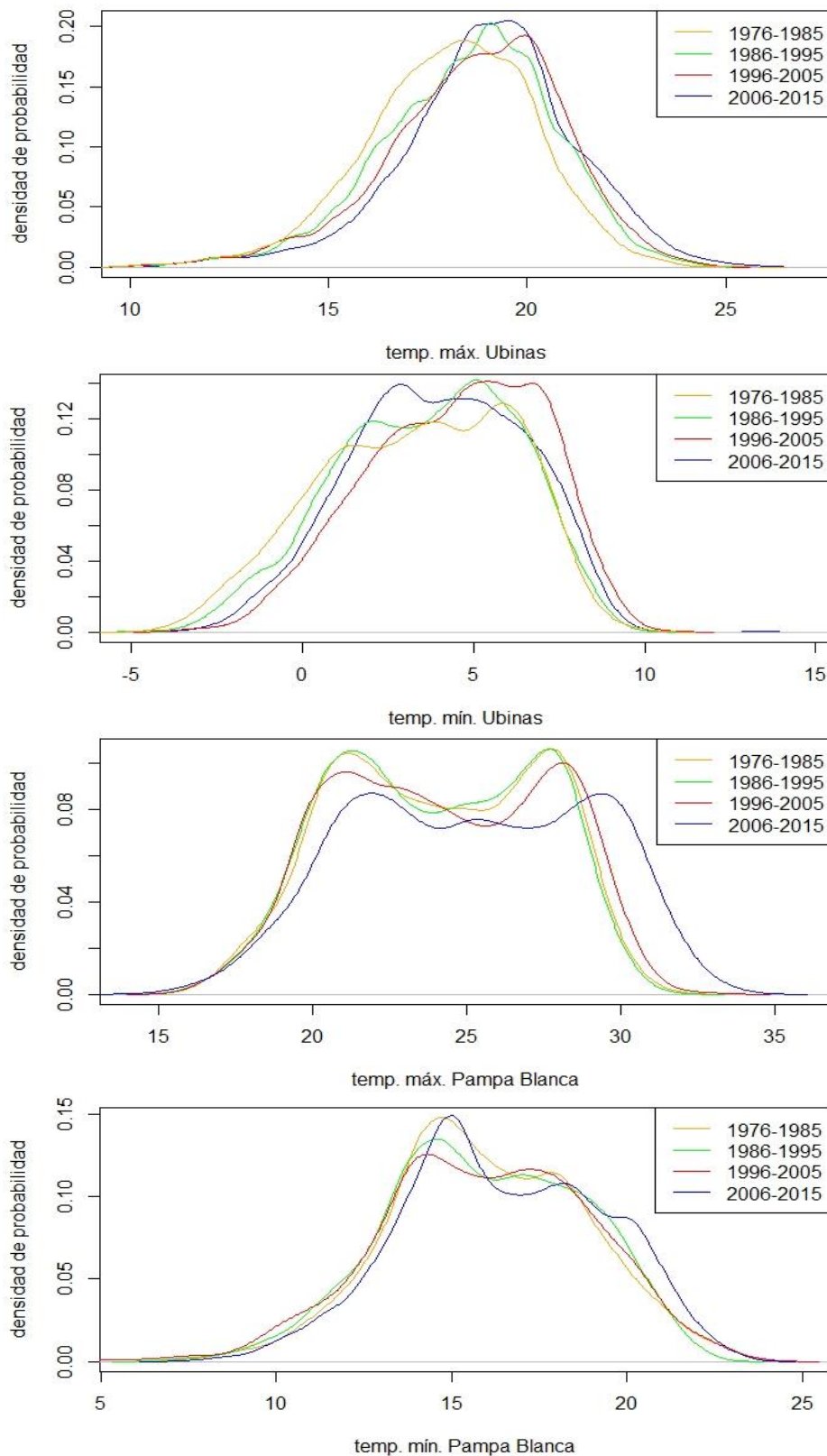


Figura 35: Curvas de densidad de probabilidad decenal de temperaturas máximas y mínimas diarias de las estaciones Ubinas (zona media) y Pampa Blanca (zona baja). Periodo 1976 – 2015

4.2.2. Variabilidad hidrológica en el río Tambo

Los resultados de la evaluación del caudal en la estación Santa Rosa a través de RCLimindex mediante los dos índices adaptados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: Resultados de los índices en la estación Santa Rosa de la cuenca en estudio. Periodo 1976 – 2015

Índice	Descripción	Pendiente	P Value
C95P	Caudal anual total en que CC>95 percentil	39.13	0.413
C99P	Caudal anual total en que CC>99 percentil	21.36	0.322

En la Figura 36 se aprecian las gráficas de los índices C95P y C99P, las cuales muestran que no se presentan pendientes significativas, lo que se traduce en que no hay tendencia al cambio a través de los años en cuanto a caudales extremadamente altos, de esta manera se corrobora lo mostrado en la Tabla 22.

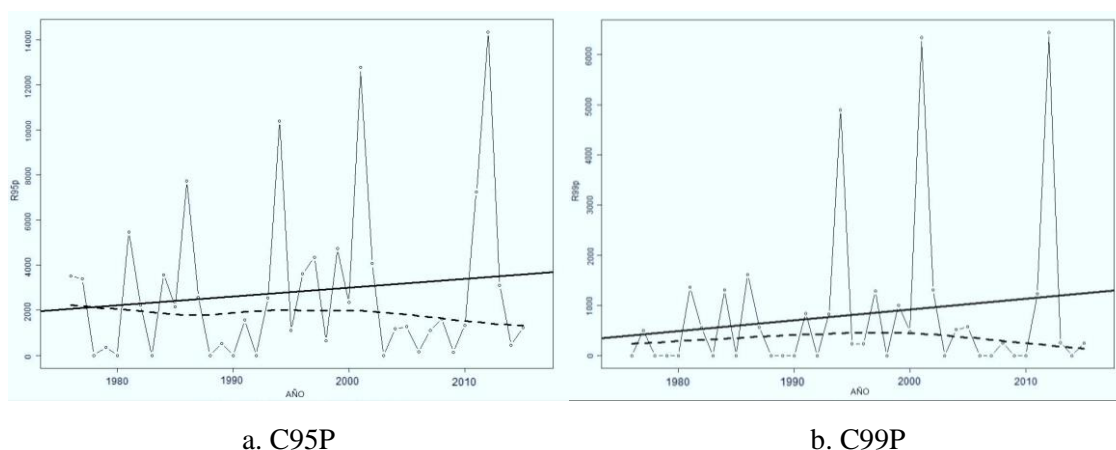


Figura 36: Índices adaptados de caudal simulado para la cuenca en estudio. Periodo 1976 – 2015

Nota. a. Índice C95P (Registra caudales que se ubican dentro del percentil 95) b. Índice C99P (Cuenta los días que presentan valores extremadamente altos de caudal y que representan datos dentro del percentil 99).

De la misma forma, a continuación se muestran las curvas de densidad de probabilidad decanal, donde se aprecia que no existe desplazamiento considerable en ningún sentido entre los periodos evaluados (Figura 37).

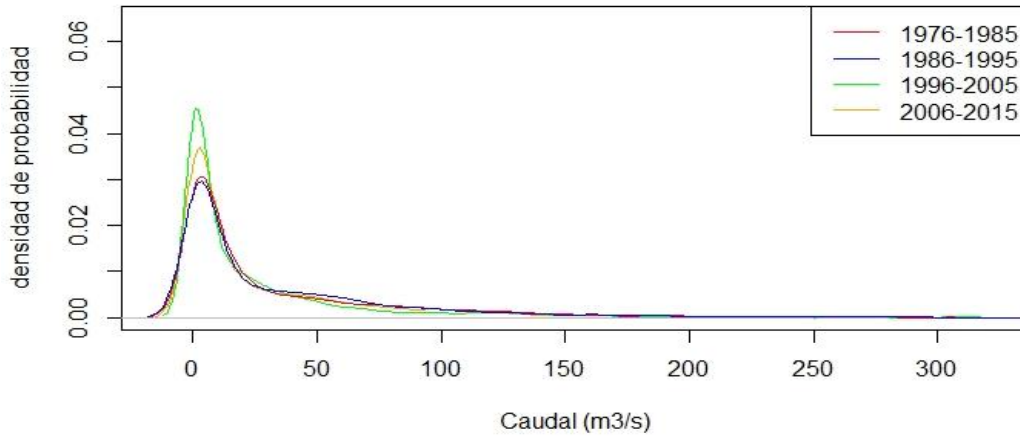


Figura 37: Curva de densidad de probabilidad decenal de caudal diario en la estación de control Santa Rosa. Periodo 1976 – 2015

En cuanto a la evaluación climática de los periodos seleccionados a través de los diferentes índices, podemos observar que en las tres zonas de la cuenca se está presentando un cambio importante de temperaturas, de acuerdo a las estaciones analizadas, esta tendencia al calentamiento parece no tener efectos significativos en el caudal de la cuenca, probablemente debido a que al producirse las lluvias, es mediante la evapotranspiración y a la cobertura vegetal presente en las zona, que se atenúan los efectos aguas abajo.

Una desviación particular se dio en la estación Ubinas en el periodo 1996-2005, las temperaturas mínimas fueron las que presentaron mayor tendencia al calentamiento que el periodo 2006-2015, sobre las temperaturas máximas, parte de ellas también tuvieron un desplazamiento mayor que el periodo final (2006–2015), esto probablemente debido a la presencia del fenómeno del Niño que se dio en los años 1997-1998. Con respecto a las lluvias durante este fenómeno, no se presentaron anomalías considerables tanto en la data observada de precipitación y caudal, por lo que en la simulación tampoco se presentaron caudales atípicos, esto se debió a que la mayor afectación se dio en el centro y norte del Perú incluido el país vecino Ecuador.

Además del caudal elevado que se dio en febrero del año 2012, provocando inundaciones y pérdidas de hasta 450 hectáreas en los cultivos de la parte baja de la cuenca, constantemente se han llevado a cabo este tipo de fenómenos, periódicamente los desbordes del río han afectado a la población que se ubica en la zona costera y se dedica a la agricultura, sin

embargo según los resultados de la simulación y la evaluación de la variabilidad hidrológica mediante RCLimindex, no se han presentado desplazamientos en las curvas de densidad de probabilidad de caudal que indiquen una tendencia al cambio, entonces ¿porque se siguen presentando inundaciones?, según el estudio elaborado por el ANA en el 2013: “Tratamiento de Cauce del Rio Tambo para el Control de Erosiones e Inundaciones”, “se encontró como factor principal a la denudación de afloramientos rocosos alterados, fracturados y erosionables que producen la colmatación del río Tambo en épocas de avenidas; y su consecuente inundación y erosión de áreas adyacentes incluidos terrenos de cultivos, centros poblados y vías de acceso (Sectores: El Tuco, Hacendados, Toma Fiscal, La Pascana, La Haciendita y otros)”.

4.2.3. Variabilidad hidrológica considerando la operación del embalse Pasto Grande a partir de 1989

A continuación en las figuras 38 y 39, se muestra la oferta hídrica en la estación Santa Rosa en los distintos niveles de persistencia: 50%, 75% y 95%, para ambos periodos correspondientes al antes y después del comienzo de operaciones del embalse Pasto Grande. Se aprecia claramente que en la época de avenidas, entre los meses de enero a abril, los mayores caudales se presentan en el periodo 1989 – 2015, que es post operación del embalse, mientras que en los meses de estiaje, este mismo periodo presenta caudales menores que el periodo 1976 – 1988, periodo correspondiente al antes de la puesta en marcha del embalse. Lo que demuestra que los caudales en época de estiaje se han visto afectados durante esta época del año.

Los valores se verán más detallados en las siguientes figuras y tablas donde se comparan los caudales promedio y los caudales a una persistencia del 75%.

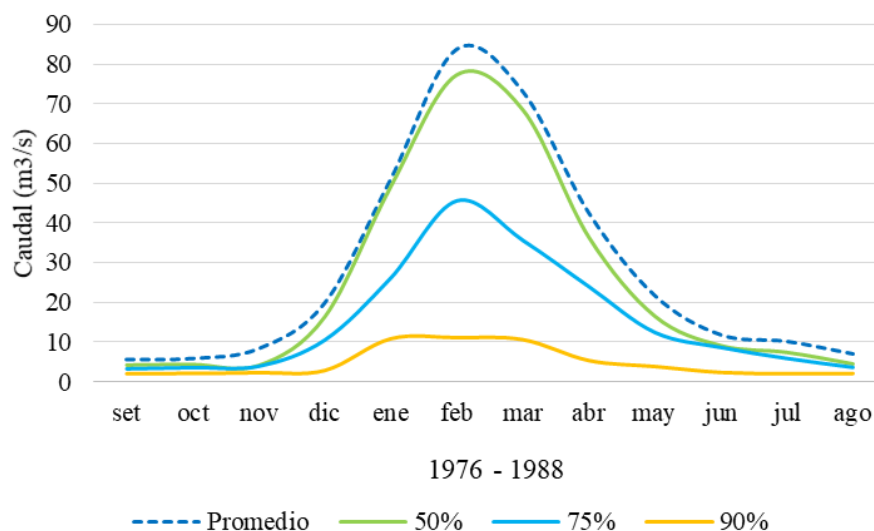


Figura 38: Oferta hídrica a distintos niveles de persistencia antes de la puesta en marcha del PERPG. Período 1976-1988

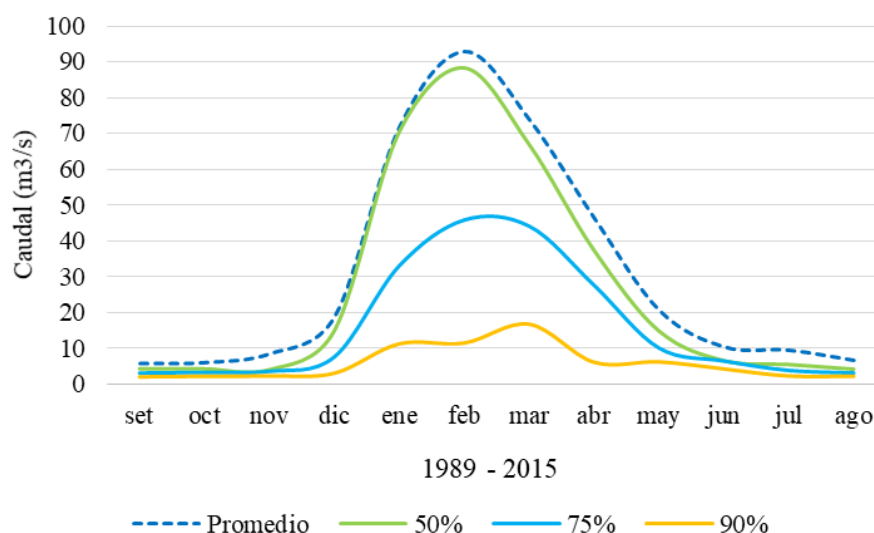


Figura 39: Oferta hídrica a distintos niveles de persistencia después de la puesta en marcha del PERPG. Período 1989-2015

Sobre los caudales medios (ver Figura 40) entre ambos periodos, se observa que el periodo post-embalse, supera en promedio en 8.72 m³/s entre los meses enero y abril, mientras que desde el mes de mayo a diciembre los caudales pre-embalse son los que superan y varían entre 1 m³/s y 2.19 m³/s. Debido a esta razón es que los problemas en la parte baja de la cuenca se siguen suscitando, el tema de la contaminación de las aguas que proviene de la parte alta de la cuenca, se agrava al tener un caudal menor que finalmente llega a las zonas

de cultivo de cientos de pobladores del valle del Tambo. Para la situación al 75% de persistencia de caudales (ver Figura 41), se aprecia un escenario similar al anterior, donde en entre los meses de mayo a diciembre, los caudales post-embalse se ven superados entre 0.23 m³/s y 2.98 m³/s en comparación al periodo pre-embalse.

El informe final elaborado por el INADE en el año 2001, concluyó que a manera de compensación para con los agricultores del valle del Tambo, la presa debía entregar 8.2 Hm³ a la cuenca entre los meses de octubre a diciembre para de alguna manera mermar la concentración de boro presente en el río y mejorar la calidad de sus aguas, según los registros del embalse esto se ha llevado a cabo desde aquellos años, pero lamentablemente en la actualidad aún existe un descontento entre los agricultores y pobladores del valle contra las autoridades pertinentes.

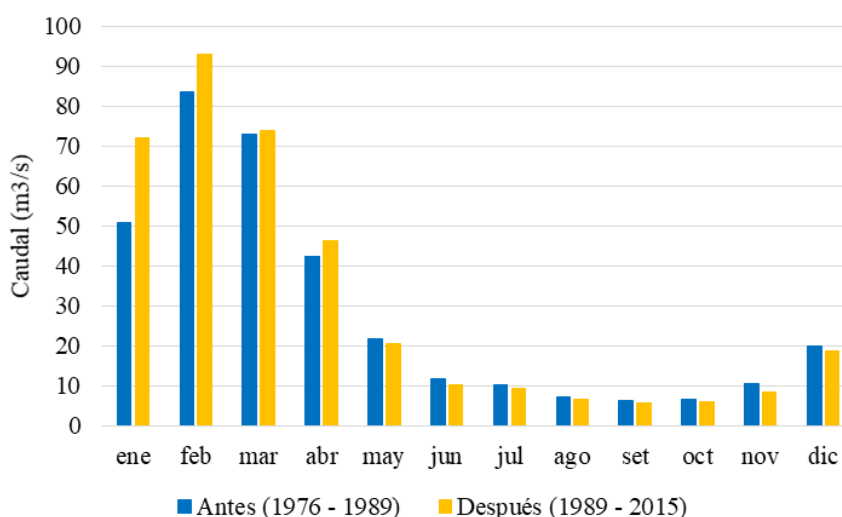


Figura 40: Comparación de caudales medios para los periodos 1976-1988 y 1989-2015

Tabla 23: Caudales medios para los periodos 1976-1988 y 1989-2015

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
Antes	50.99	83.64	73.03	42.53	21.75	11.90	10.26	7.14	6.25	6.75	10.62	19.86
Después	72.04	92.95	73.81	46.26	20.52	10.32	9.43	6.59	5.71	5.96	8.43	18.90

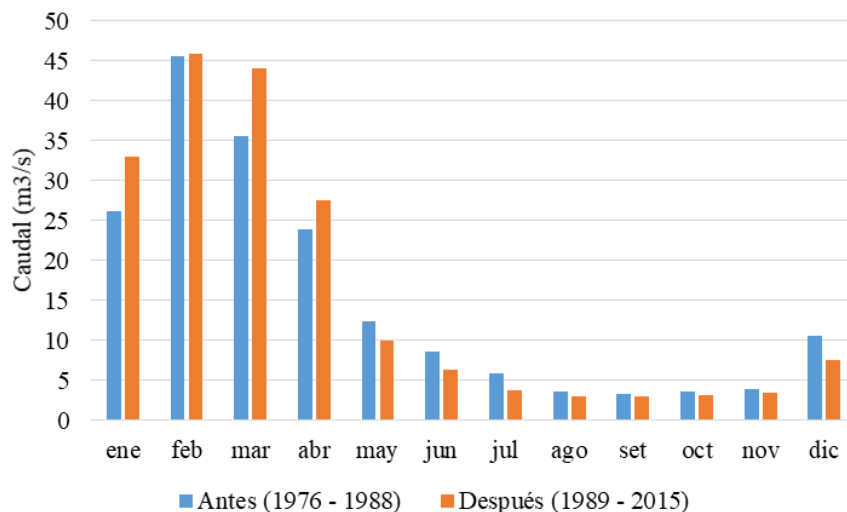


Figura 41: Comparación de caudales al 75% de persistencia para los periodos 1976-1988 y 1989-2015

Tabla 24: Caudales al 75% de persistencia. Periodos 1976-1988 y 1989-2015

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
Antes	26.16	45.59	35.64	23.96	12.42	8.64	5.89	3.63	3.25	3.58	3.91	10.52
Después	32.98	45.80	44.09	27.57	10.03	6.41	3.78	3.04	3.02	3.22	3.51	7.55

V. CONCLUSIONES

1. La simulación hidrológica llevada a cabo en la cuenca del río Tambo obtuvo valores de rendimiento según Moriasi *et al.* (2007), entre “buenos” y “satisfactorios” en la etapa de calibración a escala diaria con los siguientes resultados estadísticos: 0.65, 0.6, 0.65, -1.3 para NSE, RSR, R^2 , PBIAS respectivamente, mientras que en la etapa de validación los resultados fueron 0.53, 0.67, 0.62, 19.4 para NSE, RSR, R^2 , PBIAS respectivamente, lo que demuestra que el modelo hidrológico SWAT es confiable para la representatividad de los procesos que ocurren en la cuenca hidrográfica, se demuestra también que la herramienta SWAT CUP nos permite realizar una eficiente sensibilidad de parámetros y la posterior calibración de los mismos, de los cuales, los más sensibles fueron el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial (SURLAG), coeficiente de percolación al acuífero profundo (RCHRG_DP) y la capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua (SOL_AWC).
2. La simulación permitió obtener el caudal diario para cada una de las subcuencas desde el 1 de enero de 1976 hasta el 31 de diciembre del 2015, el caudal en la subcuenca 55, zona final de la cuenca donde se encuentra el punto de control, se encuentra entre 2.1 m^3/s y 437 m^3/s con una media de 32.93 m^3/s . Así mismo el caudal medio mensual para una probabilidad de ocurrencia al 75% varía entre 11.28 m^3/s y 44.13 m^3/s ; del análisis decanal, fue el periodo 1996-2005 el que presentó mayor volumen con valores que van de 12.54 m^3/s a 73.49 m^3/s . Con respecto al balance hídrico de oferta y demanda, se obtuvo una oferta total de 526.42 hm^3 , y no se presentó déficit en ninguno de los meses.
3. En cuanto a la variabilidad climática e hidrológica se tomaron en cuenta los índices que presentaban muy alta probabilidad de ocurrencia, mayor al 99%, las tres zonas evaluadas presentaron cambios significativos en cuanto a temperatura, la zona alta presentó una tendencia positiva en cuanto a temperatura mínima donde las temperaturas se vienen incrementando a 0.96°C/década, por otro lado, negativas con respecto al porcentaje de días fríos (-3.5 días/década), porcentaje de noches frías (-4.7 días/década) y duración de periodos fríos (-4.7 días/década); en la zona media se presentaron tendencias positivas con respecto a temperaturas máximas, temperaturas mínimas,

porcentaje de días calientes y porcentaje de noches calientes, con valores de 0.32°C/década, 0.42°C/década, 4.7 días/década, 2.9 días/década respectivamente, mientras que tendencias negativas se presentaron en el porcentaje de días fríos y porcentaje de noches frías con valores de -2.7 días/década, -3.9 días/década respectivamente; en la zona baja se presentaron tendencias positivas en cuanto a días de temperaturas máximas superiores a 31.6°C, temperaturas máximas, temperaturas mínimas, porcentaje de días calientes, periodos de seis días seguidos de temperaturas altas con valores de 2.2 días/década, 0.6°C/década, 0.29°C/década, 8.5 días/década, 7.8 días/década respectivamente, y así lo demuestran las curvas de densidad de probabilidad decanal con los notorios desplazamientos producidos. En el caso de las precipitaciones, no ocurrió lo mismo, ya que no se registraron probabilidades de ocurrencia mayores al 99%, tanto en la zona alta como en la zona media, lo que indica que se han mantenido en una aparente regularidad a través de los años. Sobre la variabilidad del caudal y los efectos que tiene la puesta en marcha el embalse Pasto Grande, se encontró que en época de estiaje los caudales se han visto disminuidos a razón de 1 a 2.5 m³/s en el periodo post operación del embalse.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la instalación de una mayor cantidad de estaciones meteorológicas en las diferentes zonas de la cuenca, a su vez, una adecuada instalación de estaciones hidrológicas en puntos estratégicos para una mejor caracterización climática, lo que conllevaría a una mejor calibración de cualquier modelo hidrológico; para el presente estudio se emplearon solo cuatro estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio, mientras que siete de ellas, se encontraban en los límites de la misma.
2. Registros históricos indican que periódicamente se producen inundaciones en la zona baja de la cuenca, que finalmente traen consigo pérdidas a los agricultores mermando su producción, por lo que se recomienda la instalación de estaciones hidrológicas de alerta temprana en la zona alta, además de la limpieza de los cauces y la colocación de defensas ribereñas, ya que la acumulación de sedimentos en la zona baja de la cuenca es una de las principales causas de estos problemas.
3. Mejorar la infraestructura hidráulica en la zona baja, ya que se pierden muchos metros cúbicos por la falta de mantenimiento, haciendo que en épocas de estiaje se acrecienten y traigan conflictos en la población. La nueva represa que se construirá en la zona alta de la cuenca, en la zona de Yanapujio, podrá dotar de agua a la zona baja, pero de no contar con el mantenimiento adecuado en la infraestructura existente, es muy probable que los problemas sociales continúen.
4. A través de los resultados del presente estudio, se recomienda aplicar modelos climáticos globales para formular el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca ante diferentes escenarios de precipitación y temperaturas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour K.C. (2012). SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT, version 2. Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Suiza. Recuperado de https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- Abbaspour, K.C.; Rouholahnejad, E.; Vaghefi, S.; Srinivasan, R.; Klöve, B. (2014). Modelling hydrology and water quality of the European Continent at a subbasin scale: calibration of a highresolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733-52. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001985>
- Andrade, M.F. (Ed.) (2018). Atlas - Clima y eventos extremos del Altiplano Central Perú-boliviano / Climate and extreme events from the Central Altiplano of Peru and Bolivia 1981-2010. *Geographica Bernensia*, 188 pp.
- Asurza, F. & Lavado W. (2020). Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2013). Tratamiento de cauce del río Tambo para el control de inundaciones. 210 pp. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2358>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018). Visor de estaciones. Recuperado de <http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>
- Cabrera, J. (2014). Modelos Hidrológicos. Lima, s.e. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Canal smnmexico. (14 de junio de 2011). Variabilidad Climática. [Archivo de video]. Youtube. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=nV9n8VkrMh8>
- Castañeda Morales, Y. (2016). Modelación del efecto del cambio de uso del Suelo en la cuenca del Rio Coello, bajo escenario de Cambio Climático, a través de la aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). [Tesis de Pregrado. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá].

- Di Luzio, M.; Srinivasan, R.; Arnold, J. & Neitsch, S. (2002). ArcView interface for SWAT 2000 – User's Guide. Texas: Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- Fattorelli, S.; Fernández, P. (2011). Diseño hidrológico. 2^{da} edición. Water Assessment & Advisory Global Network. Recuperado de <https://blogdelagua.com/actualidad/publicacion-diseno-hidrologico-de-s-fattorelli-y-p-c-fernandez-pdf-cd-descargables/>
- Fernández Palomino, C.A. (2016). Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota. Recuperado de <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/109>
- Galván Gonzalez, L. (2011). Modelización hidrológica del río Odiel. Aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas. [Tesis de Doctorado. Universidad de Huelva, España]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10272/5498>
- Guijarro J.A. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. en Islas Baleares, España. Recuperado de http://www.climatol.eu/homog_climatol-es.pdf
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2012). Estudio Hidrogeológico de la cuenca del río Tambo – Reporte preliminar de zonas críticas por peligro geológico cuenca río Tambo. 54 pp.
- Instituto Nacional de Desarrollo (INADE). (2001). Balance Hidrológico en los Valles de Tambo, Moquegua e Ilo. 194 pp. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1460>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) - Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2005). Estudio de Factibilidad Afianzamiento Hídrico del valle de Tambo. Volumen II-1 Anexo 1. Climatología e hidrología. 84 pp. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3411>
- IPCC. (2012a). “Resumen para responsables de políticas” en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático [edición a cargo de C.B. Field, C.B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, y P. M. Midgley].
- León Ochoa, R.F. (2017). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina]. Recuperado de

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2877>

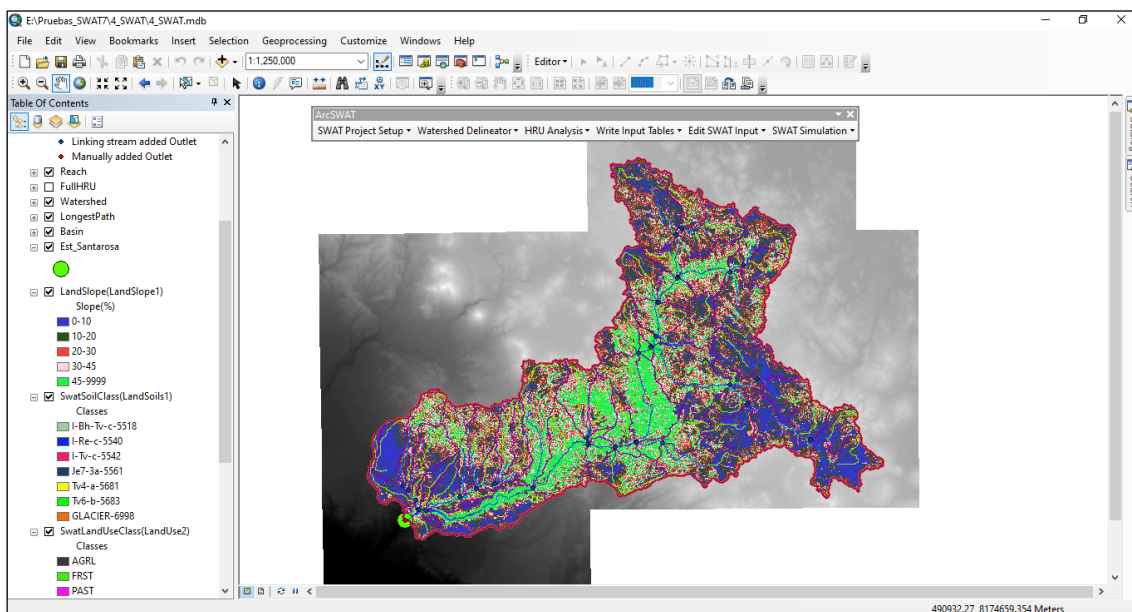
- López, M.P. (2012). Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú. [Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña. España]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099.1/18380>
- Marroquín, A. (2016). Balance hídrico superficial de la subcuenca del río Paltiture [Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura]. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11042/2573>
- Martínez Loayza, C.R. (2014). Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina]. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1849>
- Moriassi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50, 885-900.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R. & Williams, J.R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical documentation: version 2009. Reporte Técnico N°406. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, 647 pp. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/docs/>
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. (2005). Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation. Grassland, Version 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas.
- Pisani Veiga, B. (2008). Acoplamiento de Modelos Hidrológicos Semidistribuidos y Sistemas de Información Geográfica [Tesis de Doctorado. Universidade Da Coruña, España]. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2183/1102>
- Salgado, R.J.H. & Güitrón de los Reyes, A. (2012). Aplicabilidad de los Modelos Hidrológicos Distribuidos, Applicability of the Distributed Hydrological Models.
- Santhi, C.; Arnold, J.; Williams, J.; Dugas, W.; Srinivasan, R.; Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. American Water Resources Assoc. 37(5): 1169-1188.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2018). Datos – Descarga de datos meteorológicos. Recuperado de <https://senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
- Tapia Alvarado, A.P. (2016). Balance hídrico usando un modelo hidrológico distribuido en

la Unidad Hidrográfica río Pindo, provincias de Loja y El Oro, Ecuador [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina]. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2821>

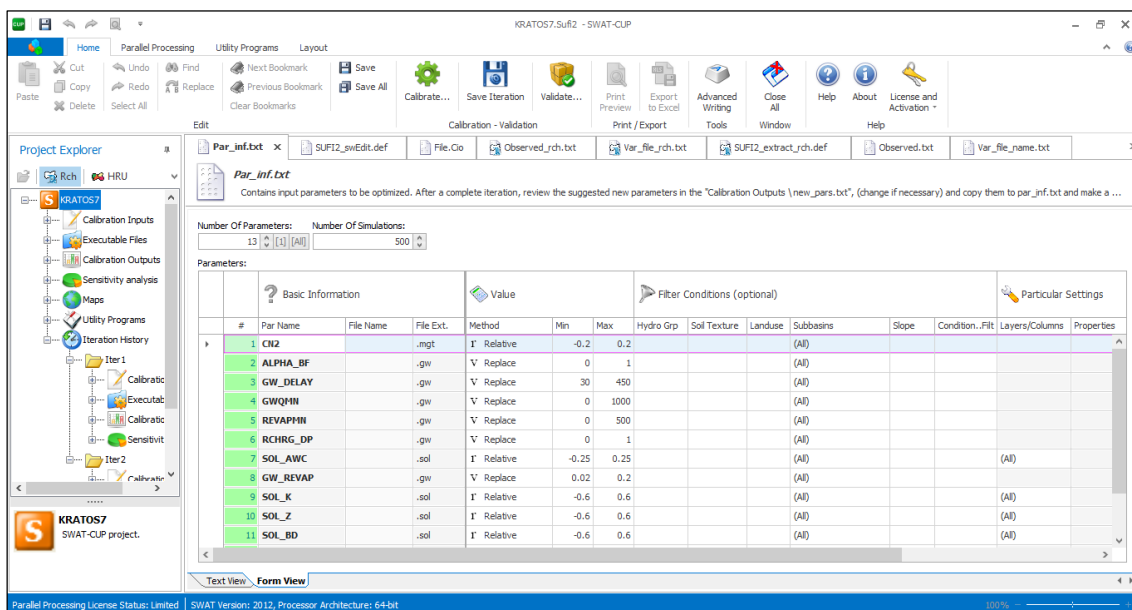
- Uribe, N.; Quintero, M. y Valencia, J. (2013). Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 46 p.
- Urrutia M.A. (2016). Aplicación del Modelo SWAT para la Simulación del Ciclo Hidrológico de la Cuenca Alta del Río San Juan bajo la influencia de la actividad minera. [Tesis de Maestría. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito. Bogotá.].
- Valladares Martel, E.A. (2017). Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio climático. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina]. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3367>
- Villón, M. (2011). Hidrología Estadística. Lima. Taller de publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica P. 307-334.
- Zhang, X. y Yang, F. (2004). RCLimDex (1.0). Manual del Usuario. Climate Research Branch Environment Canada. Versión en español: Santos, J. L. Centro Internacional para la investigación del Fenómeno El Niño (CIIFEN). 22 p.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Plataforma ARCSWAT



Anexo 2: Plataforma de la Calibración Automática mediante SWATCUP



Anexo 3: Hidrogramas de caudales simulados a escala diaria en las 55 subcuencas de la zona de estudio

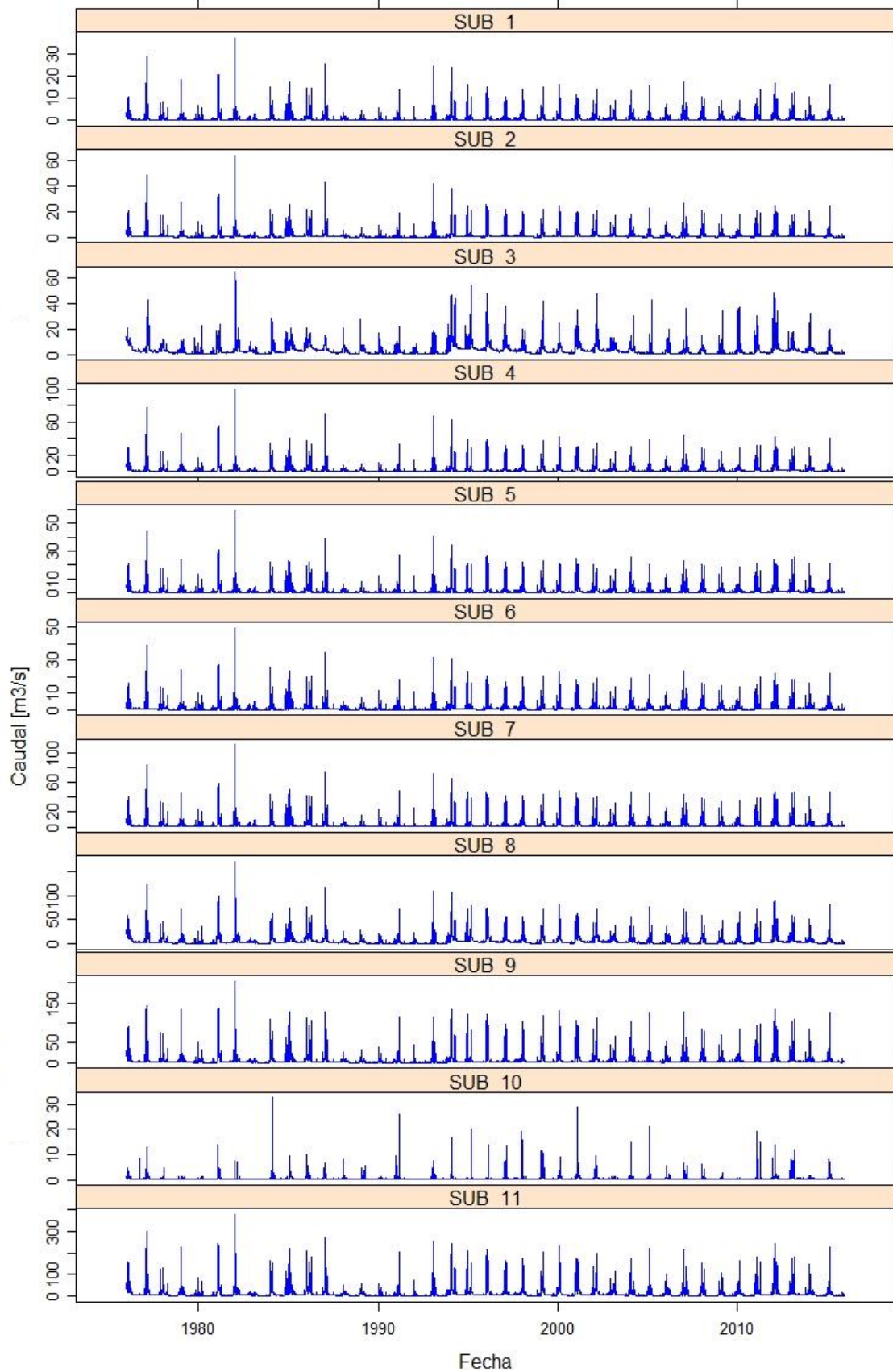


Figura 42: Hidrogramas de la subcuencas 1 a la 11

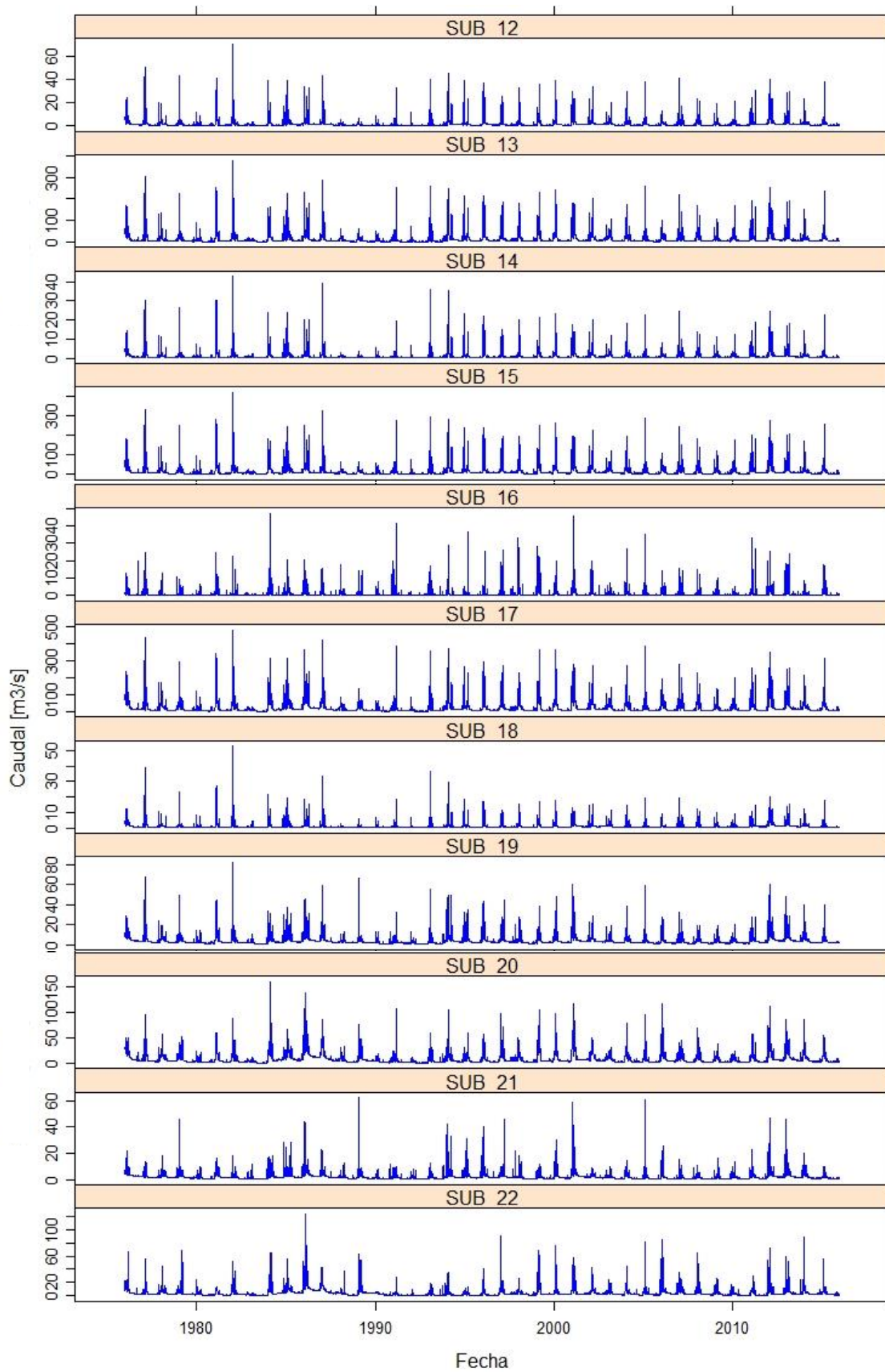


Figura 43: Hidrogramas de la subcuencas 12 a la 22

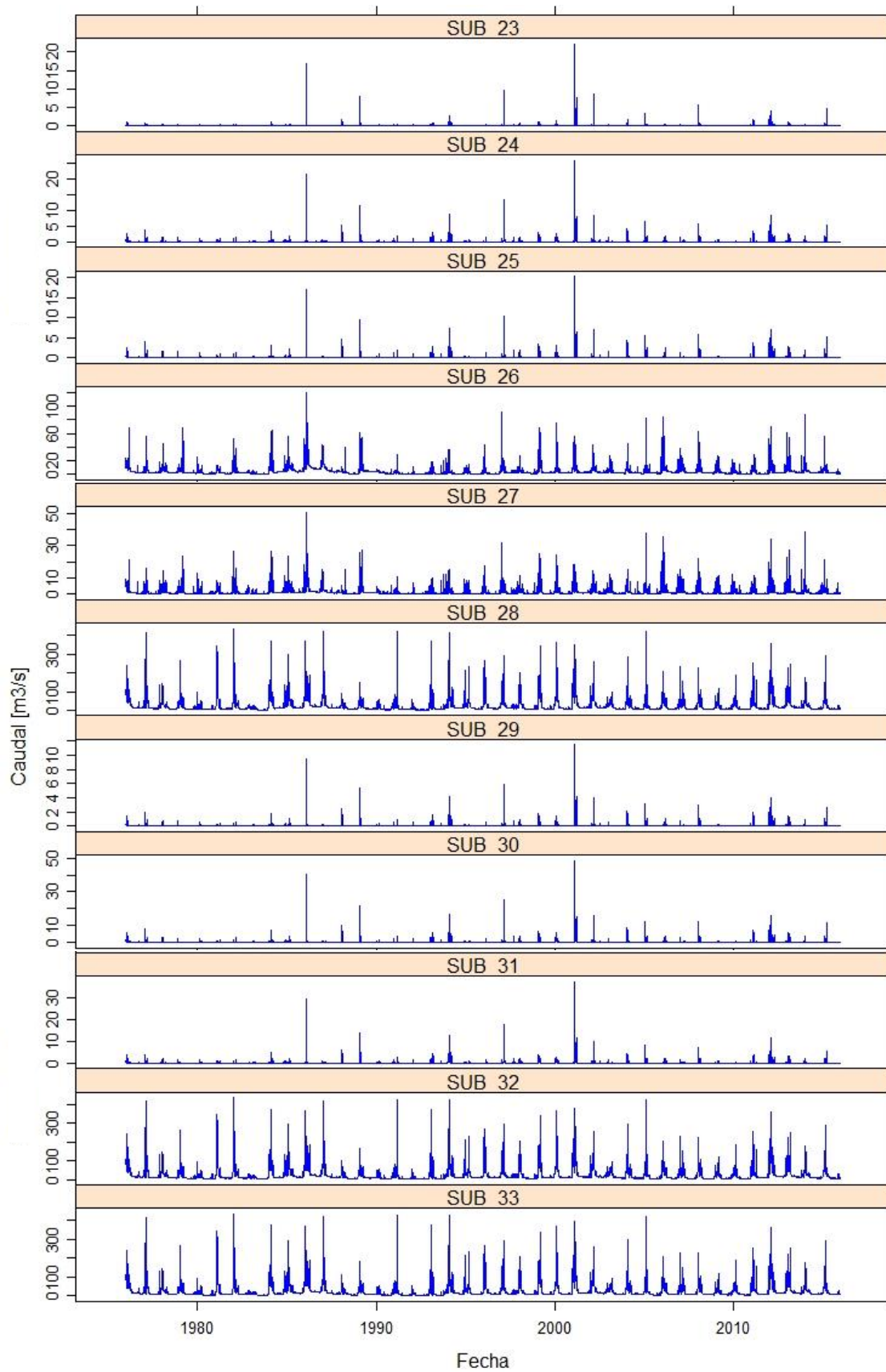


Figura 44: Hidrogramas de la subcuencas 23 a la 33

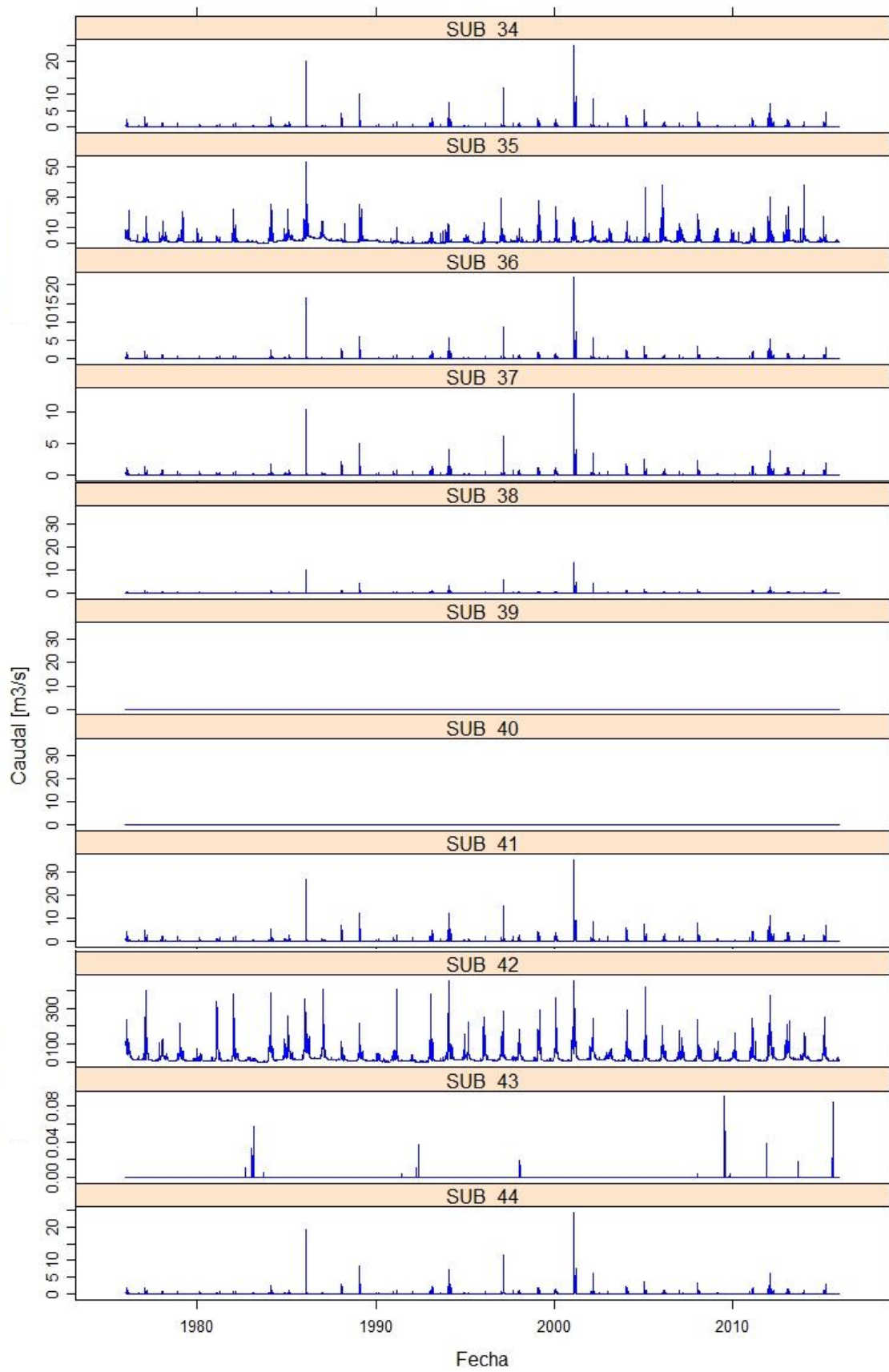


Figura 45: Hidrogramas de la subcuencas 34 a la 44

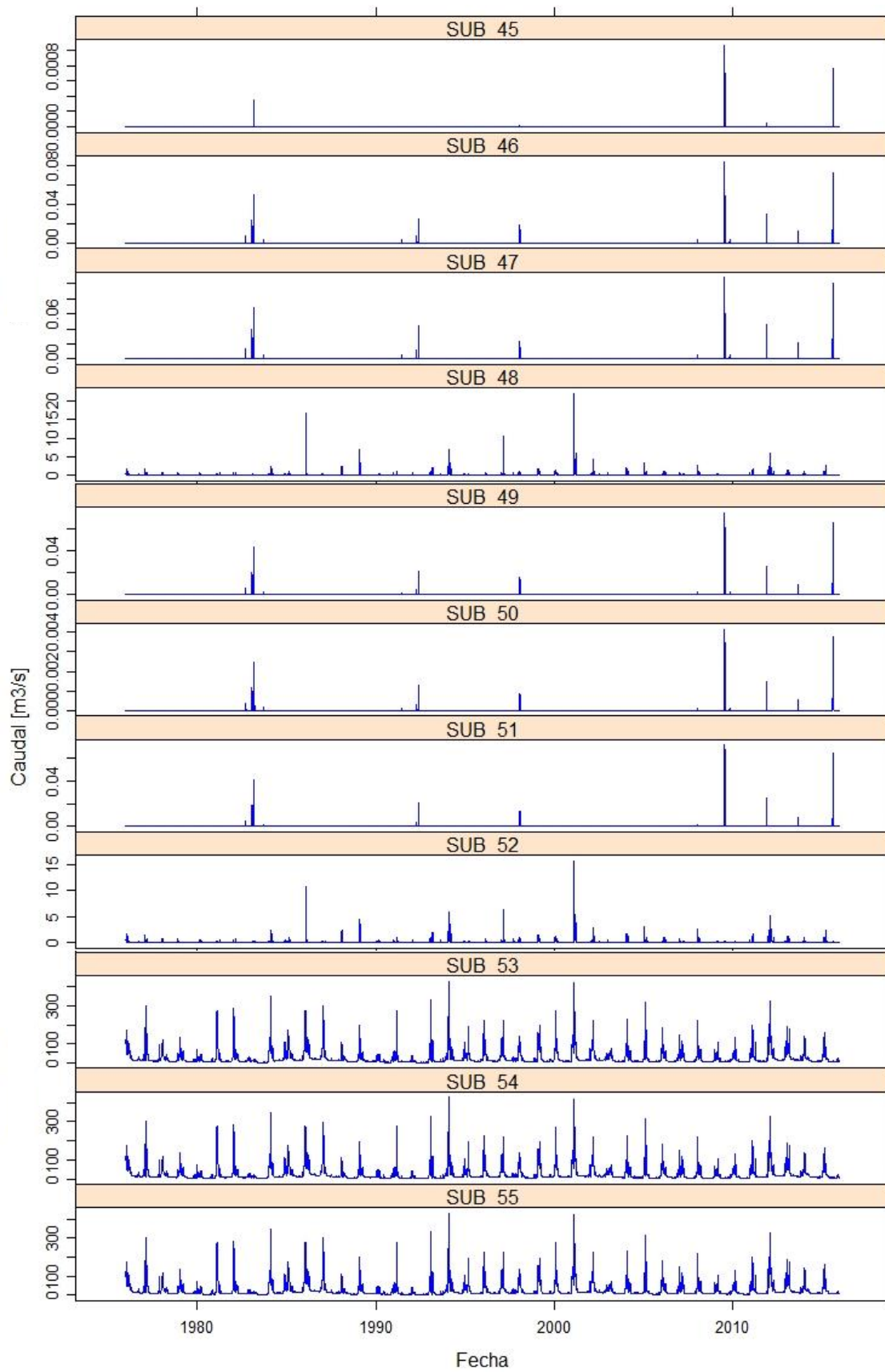


Figura 46: Hidrogramas de la subcuencas 45 a la 55

Anexo 4: Precipitación diaria de las estaciones utilizadas para este estudio

Tabla 25: Precipitación estación Crucero Alto (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	158.8	75.3	159.3	31.7	0.0	0.0	0.8	0.0	51.8	19.9	24.6	94.1	616.3
1973	330.5	209.2	135.5	64.6	0.0	0.0	5.2	11.2	31.0	9.1	5.8	43.6	845.7
1974	264.3	169.8	97.6	85.9	0.0	19.7	1.8	77.0	11.7	5.0	0.0	25.6	758.4
1975	148.8	156.0	115.7	27.8	8.4	0.0	0.0	0.0	16.9	16.5	7.0	217.8	714.9
1976	178.9	72.7	83.6	12.1	0.0	0.0	15.0	16.6	53.7	3.0	6.3	63.0	504.9
1977	48.9	166.6	233.9	2.0	0.0	0.0	10.2	34.5	0.0	72.1	80.6	99.7	748.5
1978	152.2	7.9	69.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.9	27.9	68.6	44.4	396.9
1979	116.2	51.9	123.1	9.7	0.0	0.0	3.4	16.0	0.0	52.8	60.8	71.9	505.8
1980	22.7	33.3	129.5	0.5	0.7	0.0	11.3	2.0	22.8	83.5	9.6	30.1	346.0
1981	224.2	165.1	113.5	40.0	0.0	0.0	0.0	17.8	0.1	7.6	25.8	89.4	683.5
1982	235.7	63.7	211.2	36.8	0.0	0.0	0.0	10.1	25.0	40.8	79.9	9.7	712.9
1983	40.4	28.3	42.0	59.7	0.0	0.0	0.0	0.0	20.8	0.0	0.0	39.5	230.7
1984	174.4	218.4	180.8	11.3	9.6	1.3	3.1	6.4	0.3	89.5	135.7	84.1	914.9
1985	66.0	196.6	138.1	73.0	20.0	11.2	0.6	5.3	14.2	0.0	82.8	115.2	723.0
1986	140.8	164.0	181.8	62.4	3.9	0.0	2.5	10.0	2.4	0.6	9.4	90.7	668.5
1987	203.2	38.6	40.7	0.0	0.8	0.0	21.2	1.8	0.0	15.3	23.0	28.0	372.6
1988	213.8	52.0	81.3	79.2	10.1	0.0	0.0	0.0	1.1	10.9	3.2	82.4	534.0
1989	176.7	91.8	116.2	34.9	6.2	4.0	11.8	3.7	0.0	3.7	24.8	12.7	486.5
1990	179.1	30.2	85.7	41.7	15.9	45.6	0.0	12.5	0.0	19.6	91.8	82.6	604.7
1991	135.5	81.0	138.3	7.4	1.7	27.2	0.0	0.0	2.1	16.9	23.5	80.2	513.8
1992	74.7	102.0	12.9	7.8	0.0	0.9	1.4	18.0	0.0	7.8	19.5	82.4	327.4
1993	196.5	27.7	116.4	53.9	1.3	0.0	0.1	15.6	4.6	61.8	129.5	163.4	770.8
1994	237.9	209.5	167.8	136.9	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.7	87.1	927.0
1995	86.1	135.1	216.2	31.5	0.1	0.0	0.0	0.5	8.7	16.7	49.1	67.8	611.8
1996	198.3	177.2	92.7	49.9	13.7	0.0	0.0	11.0	0.4	4.1	14.0	121.3	682.6
1997	170.2	165.1	65.1	29.6	4.8	0.0	0.0	21.5	24.1	0.5	48.6	41.4	570.9
1998	159.3	69.8	93.1	16.7	0.0	11.4	0.0	2.6	1.7	20.5	39.7	53.2	468.0
1999	83.1	201.2	172.9	44.4	6.2	0.0	0.0	7.1	2.8	72.2	0.0	54.6	644.5
2000	173.3	129.0	59.6	10.2	12.5	4.3	0.0	1.6	0.2	41.3	10.0	97.2	539.2
2001	226.0	185.0	100.6	50.1	6.5	0.7	0.0	5.4	0.5	13.8	29.3	29.1	647.0
2002	88.3	179.4	192.5	129.5	8.9	3.4	20.6	0.2	0.3	57.7	27.9	143.2	851.9
2003	97.0	124.9	104.2	27.6	6.4	0.5	0.0	6.6	2.9	0.4	5.8	68.3	444.6
2004	138.6	108.9	87.8	53.7	0.0	0.0	13.3	7.0	5.1	2.3	8.4	38.8	463.9
2005	51.6	121.7	57.6	53.7	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4	2.9	19.7	96.7	414.3
2006	148.7	119.1	152.0	39.3	0.2	0.1	0.0	2.7	6.9	5.4	53.4	55.4	583.2
2007	89.1	78.0	162.5	36.3	4.6	0.2	2.1	0.0	5.6	10.8	32.1	50.2	471.5
2008	196.3	53.6	38.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	11.4	10.6	103.9	414.7
2009	82.1	147.9	45.0	33.4	0.0	0.0	8.8	0.0	13.5	3.4	56.8	44.2	435.1
2010	189.2	192.6	64.4	45.9	4.8	1.3	0.1	0.3	3.4	8.6	6.3	125.0	641.9
2011	119.6	175.8	100.0	12.3	1.4	0.0	15.1	1.4	1.8	7.8	28.1	129.3	592.6
2012	203.3	220.0	105.5	83.8	8.9	0.0	0.0	0.0	8.8	54.0	7.9	103.0	795.2
2013	158.5	123.3	78.7	4.4	11.8	11.5	6.8	8.4	0.0	35.9	17.9	105.2	562.4
2014	178.9	46.1	62.5	52.3	9.9	9.0	9.3	12.8	20.8	21.7	17.7	26.2	467.2
2015	147.9	143.5	133.7	73.3	9.3	12.0	15.3	14.6	26.1	29.0	37.1	32.5	674.3
Promedio	152.4	120.7	112.7	39.9	4.7	3.7	4.1	8.2	9.8	22.4	34.1	75.5	588.3
Máx	330.5	220.0	233.9	136.9	20.1	45.6	21.2	77.0	53.7	89.5	135.7	217.8	927.0
Mín	22.7	7.9	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	230.7

FUENTE: SENAMHI

Tabla 26: Precipitación estación Ichuña (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	142.5	100.0	124.6	6.6	1.2	0.0	0.0	0.0	47.3	11.6	20.9	124.0	578.7
1973	207.0	120.3	89.7	53.5	2.0	0.0	0.0	6.2	31.2	0.0	2.1	33.2	545.2
1974	231.1	131.8	49.1	44.4	1.0	10.2	0.0	84.0	5.2	3.3	4.0	79.4	643.5
1975	160.0	145.4	84.7	5.6	7.9	2.2	0.0	0.0	3.6	10.6	9.7	173.3	603.0
1976	140.9	132.3	69.2	31.5	6.2	0.0	6.6	12.5	33.9	0.0	0.0	69.8	502.9
1977	97.9	198.7	101.7	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	42.4	110.1	66.5	631.2
1978	155.3	12.5	40.2	65.9	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	55.9	115.8	446.8
1979	148.9	47.5	85.8	23.4	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	20.2	54.7	95.2	482.4
1980	39.8	40.7	104.5	10.0	0.1	0.0	0.0	0.0	15.3	74.7	13.5	23.4	322.0
1981	120.3	288.7	42.8	52.9	0.0	0.0	0.0	12.3	22.8	13.8	16.7	109.3	679.6
1982	189.7	33.2	115.1	36.1	0.0	0.0	0.0	3.4	21.7	54.6	64.9	14.7	533.4
1983	29.7	33.2	42.0	20.6	3.5	0.0	0.0	0.5	5.7	9.1	0.0	101.7	246.0
1984	217.2	168.6	47.9	13.2	0.0	7.1	0.0	6.0	0.0	70.2	141.3	82.3	753.8
1985	69.7	198.4	74.8	56.8	17.4	7.6	2.2	2.1	19.4	4.3	67.8	62.8	583.3
1986	181.2	155.8	155.4	69.7	5.2	0.0	24.1	3.4	3.1	0.0	10.9	104.7	713.5
1987	260.3	65.9	29.6	0.0	0.0	2.5	25.3	0.0	0.0	4.4	28.5	8.3	424.8
1988	131.2	23.9	81.4	36.9	12.4	0.0	0.0	0.0	3.6	14.2	0.0	72.1	375.7
1989	124.8	60.2	65.1	24.9	6.7	8.4	4.6	0.0	6.7	3.5	11.5	18.4	334.8
1990	111.4	32.6	48.3	20.1	10.8	42.9	0.0	8.9	0.0	22.0	73.2	46.1	416.3
1991	72.5	74.7	116.4	16.1	1.3	23.6	0.0	0.0	3.3	10.5	10.2	29.1	357.7
1992	84.5	29.0	2.5	8.2	0.0	4.0	0.0	20.3	0.0	16.7	11.8	59.9	236.9
1993	215.8	37.0	137.0	28.6	0.0	7.1	0.0	15.4	2.1	32.0	77.7	74.3	627.0
1994	165.3	234.8	92.3	106.4	4.8	0.0	0.0	0.0	2.1	0.3	41.8	103.8	751.6
1995	85.2	67.5	111.2	16.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	1.9	25.7	81.6	390.1
1996	245.7	139.9	54.4	31.9	8.9	0.0	0.0	22.9	2.1	7.5	37.0	67.6	617.9
1997	145.9	200.7	27.8	33.7	8.5	0.0	0.0	26.0	41.9	14.1	47.3	54.9	597.8
1998	192.3	94.0	50.5	8.6	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	2.6	55.6	27.5	432.6
1999	62.0	214.3	183.1	54.4	1.3	0.0	0.0	4.7	0.5	45.0	1.0	68.0	634.3
2000	198.4	142.7	54.4	21.1	3.1	0.0	0.0	4.7	0.0	30.0	5.1	118.4	577.9
2001	233.6	195.3	116.0	38.9	4.1	0.0	0.5	6.7	2.6	23.4	29.3	83.1	733.5
2002	73.6	176.6	180.8	44.0	7.0	0.5	18.3	0.6	7.1	45.2	44.6	80.6	678.9
2003	76.2	120.7	110.2	27.1	3.2	0.0	0.0	4.1	0.0	14.6	1.7	62.3	420.1
2004	139.1	123.7	79.4	51.5	0.0	0.0	14.9	9.4	18.0	0.0	14.0	48.1	498.1
2005	114.1	168.6	58.6	27.1	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	4.7	27.4	77.0	495.2
2006	185.5	83.8	110.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	10.9	63.7	91.9	574.8
2007	144.3	57.4	146.4	28.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	9.9	29.6	95.0	512.3
2008	174.2	91.6	67.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	5.7	0.0	136.5	478.8
2009	73.2	161.6	48.6	36.9	1.2	0.0	13.6	0.0	26.5	7.6	60.9	86.4	516.5
2010	129.8	191.0	30.5	38.7	10.5	0.0	1.7	0.0	0.0	8.6	5.2	168.6	584.6
2011	155.8	205.7	77.4	62.3	1.2	0.0	0.0	0.0	38.0	0.0	33.2	112.8	686.4
2012	220.2	219.9	151.5	77.2	15.1	0.0	0.0	0.0	4.0	9.7	26.9	149.7	874.2
2013	139.5	115.1	80.6	2.4	17.0	10.1	9.4	15.3	0.0	51.4	26.8	116.3	583.9
2014	156.1	40.7	70.1	38.9	1.6	0.0	0.0	11.2	16.0	18.8	19.4	29.1	401.9
2015	142.3	98.5	117.8	71.3	0.0	6.0	5.7	15.9	10.0	13.1	44.3	20.0	544.9
Promedio	145.1	119.9	84.7	33.3	3.7	3.0	2.9	7.0	9.8	16.9	32.4	78.3	536.9
Máx	260.3	288.7	183.1	106.4	17.4	42.9	25.3	84.0	47.3	74.7	141.3	173.3	874.2
Mín	29.7	12.5	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	236.9

FUENTE: SENAMHI

Tabla 27: Precipitación estación Imata (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	158.9	99.0	131.2	17.9	1.1	1.2	0.6	0.0	41.5	30.5	8.3	81.0	571.2
1973	245.1	190.6	144.8	31.4	11.1	0.0	4.3	7.8	41.1	9.1	27.5	24.5	737.3
1974	342.8	203.7	68.5	52.2	0.0	24.8	0.8	56.6	1.4	0.0	5.1	60.0	815.9
1975	161.8	180.6	92.5	21.8	11.7	1.1	0.0	0.0	1.0	18.3	7.6	157.3	653.7
1976	137.8	76.9	111.5	20.4	9.9	0.9	9.5	18.7	73.7	0.1	0.0	77.1	536.5
1977	54.1	173.7	132.7	0.8	1.3	0.0	1.9	0.0	5.2	8.9	93.9	70.2	542.7
1978	244.9	36.8	85.1	50.5	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	16.7	77.8	76.5	589.0
1979	85.2	44.3	100.9	5.3	0.0	0.0	0.5	1.6	0.0	21.9	59.6	115.0	434.3
1980	49.1	62.7	118.0	7.6	0.3	0.0	6.5	3.9	11.1	93.5	6.8	26.7	386.2
1981	196.0	260.9	75.3	50.3	0.0	0.0	0.0	28.1	2.6	1.5	12.2	88.8	715.7
1982	115.0	45.6	114.1	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.3	35.7	80.8	9.5	448.0
1983	28.4	36.3	33.7	30.5	8.8	2.0	0.0	1.5	8.0	0.6	0.0	33.4	183.2
1984	183.7	185.5	135.5	12.2	1.2	3.8	0.0	0.4	0.4	59.9	71.3	69.9	723.8
1985	38.2	210.8	165.0	97.4	14.5	9.0	0.0	0.5	3.4	0.0	80.4	91.7	710.9
1986	119.6	167.3	145.8	46.6	0.9	0.0	1.7	9.8	2.1	3.0	6.6	135.7	639.1
1987	153.4	54.7	18.1	9.5	2.0	2.0	17.6	0.4	3.0	15.1	24.8	13.1	313.7
1988	200.7	35.0	102.6	65.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	8.0	0.0	38.1	457.0
1989	126.0	75.6	109.2	52.7	8.0	1.7	1.2	0.3	0.0	1.0	15.8	3.8	395.3
1990	113.0	21.2	56.6	23.6	12.2	29.7	0.0	7.5	0.0	16.7	109.3	96.6	486.4
1991	114.2	74.9	133.9	8.5	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	12.1	31.4	49.6	440.6
1992	44.0	42.9	8.3	5.0	0.0	2.5	0.3	4.5	0.0	7.3	22.1	105.0	241.9
1993	182.3	36.6	136.4	22.1	0.0	1.8	0.0	15.0	0.8	35.0	42.1	88.0	560.1
1994	210.4	182.4	86.5	66.6	3.2	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	28.0	79.0	657.1
1995	60.8	62.6	102.1	14.8	0.0	0.0	0.0	0.3	8.8	1.0	41.2	49.5	341.1
1996	141.4	168.4	66.3	47.8	6.4	0.0	0.0	8.3	0.0	0.7	19.2	87.0	545.5
1997	117.1	182.6	52.5	14.3	10.5	0.0	0.0	27.4	44.0	0.1	3.8	43.9	496.2
1998	124.0	89.9	60.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	3.6	35.4	74.8	388.5
1999	76.5	218.5	255.7	66.2	1.6	0.0	0.0	1.8	15.7	49.3	1.6	74.6	761.5
2000	165.0	116.3	74.3	12.8	7.9	0.9	0.4	1.0	0.0	35.1	5.6	74.6	493.9
2001	210.3	177.3	93.0	54.9	2.0	0.5	0.1	3.8	5.4	9.4	5.1	17.2	579.0
2002	54.2	178.0	159.4	68.1	6.0	0.1	21.5	2.4	0.4	20.7	53.1	90.3	654.2
2003	91.5	87.9	101.7	19.5	14.1	0.9	0.2	14.3	0.9	6.2	11.6	54.2	403.0
2004	141.2	120.7	77.7	27.6	0.0	0.0	22.4	5.3	7.4	0.2	0.0	63.7	466.2
2005	88.9	152.3	77.9	33.4	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	3.3	19.1	92.3	484.7
2006	216.0	139.0	153.7	28.6	0.2	0.0	0.0	0.4	3.6	9.1	44.9	52.8	648.3
2007	133.8	96.0	156.1	35.4	7.7	0.0	0.0	0.0	0.9	4.3	35.9	39.8	509.9
2008	150.5	85.8	46.7	1.3	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	5.9	6.3	78.5	375.5
2009	109.0	187.9	71.6	71.7	0.3	0.0	10.8	0.0	15.1	6.2	55.2	33.1	560.9
2010	162.6	189.8	85.0	26.5	7.2	0.4	0.3	0.0	3.3	10.2	14.4	113.0	612.7
2011	119.7	180.7	119.2	43.2	3.1	0.0	3.6	0.0	13.0	1.8	28.0	155.6	667.9
2012	182.2	174.6	101.0	93.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	47.5	7.9	165.1	779.5
2013	187.4	118.1	67.0	0.0	11.2	8.9	14.9	10.5	0.0	16.7	7.4	129.5	571.6
2014	125.8	24.5	50.8	27.8	0.6	0.0	0.0	1.1	21.1	16.2	8.2	30.1	306.2
2015	155.0	114.2	121.7	62.7	0.0	0.0	7.4	2.6	18.6	36.2	32.0	26.5	576.9
Promedio	139.0	121.9	100.0	33.5	3.8	2.5	2.9	5.4	9.2	15.4	28.3	71.3	533.2
Máx	342.8	260.9	255.7	97.4	14.5	29.7	22.4	56.6	73.7	93.5	109.3	165.1	815.9
Mín	28.4	21.2	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	183.2

FUENTE: SENAMHI

Tabla 28: Precipitación estación La Joya (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	0.0	1.2	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.7
1973	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1974	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1976	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1979	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1984	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1990	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
1993	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1994	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2000	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2002	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
2008	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
2009	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
2010	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
2011	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	2.5
2012	0.6	2.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2
2013	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	0.1	0.0	0.1	0.0	1.1
Promedio	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Máx	1.2	2.5	2.2	0.6	0.4	0.0	0.6	0.6	0.1	0.0	0.1	0.6	3.7
Mín	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FUENTE: SENAMHI

Tabla 29: Precipitación estación Laraqueri (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	230.2	197.8	111.7	16.3	3.6	0.0	0.0	0.0	29.6	49.7	51.0	170.3	860.2
1973	195.9	123.7	129.7	46.7	18.7	0.0	5.0	12.2	55.7	10.9	26.7	85.2	710.4
1974	274.1	245.8	100.5	51.2	0.0	1.1	0.0	57.4	20.0	12.1	16.5	74.5	853.2
1975	153.1	258.0	112.4	23.5	31.7	3.1	0.0	8.1	21.7	61.8	43.1	260.8	977.3
1976	355.5	135.4	218.3	40.8	18.4	0.0	27.6	29.8	64.4	14.6	0.0	84.6	989.4
1977	66.8	191.0	148.3	7.0	5.3	0.0	0.0	0.0	21.1	55.6	88.3	126.4	709.8
1978	209.0	147.5	101.9	43.1	0.0	0.0	18.6	1.5	15.2	8.4	158.1	109.0	812.3
1979	190.2	115.0	125.6	22.3	0.0	1.2	9.3	1.7	5.0	29.7	53.5	56.5	610.0
1980	93.8	58.4	239.5	8.0	0.0	0.0	4.0	15.7	40.2	87.5	30.1	38.1	615.3
1981	244.1	277.0	125.5	54.0	1.9	0.0	0.0	30.2	32.4	18.0	22.5	161.5	967.1
1982	157.3	88.9	92.1	26.9	0.0	0.0	0.0	4.3	41.7	64.6	82.1	23.5	581.4
1983	97.8	78.1	18.7	8.4	0.0	1.6	0.0	3.5	17.1	14.6	15.8	105.1	360.7
1984	321.7	232.1	248.6	38.8	18.7	33.6	0.0	17.6	1.8	68.7	156.9	115.6	1254.1
1985	135.2	190.9	105.3	140.6	24.4	13.4	0.0	0.0	44.0	7.8	148.7	204.2	1014.5
1986	159.3	283.3	238.3	100.7	8.2	0.2	0.0	9.4	11.7	1.8	43.7	151.2	1007.8
1987	280.9	77.1	74.3	26.2	0.0	0.0	36.5	6.5	8.6	23.5	57.0	28.5	619.1
1988	199.5	45.1	179.1	130.7	9.6	2.5	0.0	0.0	5.9	44.6	13.2	101.4	731.6
1989	225.5	130.9	129.0	77.3	3.5	5.3	2.4	5.4	4.8	0.0	26.1	44.6	654.8
1990	135.7	36.7	80.8	11.0	15.3	55.3	0.0	15.7	9.4	99.4	141.5	128.5	729.3
1991	130.1	131.0	148.2	27.6	2.9	43.6	0.0	0.6	21.8	28.5	30.1	64.0	628.4
1992	120.7	100.0	59.5	39.5	0.0	3.9	15.7	31.9	0.0	61.9	48.9	102.1	584.1
1993	206.4	66.2	133.8	61.0	14.1	1.5	0.0	34.6	18.3	123.4	126.8	176.9	963.0
1994	206.8	197.2	148.8	110.0	14.8	1.5	1.5	0.0	5.9	8.7	74.3	140.1	909.6
1995	140.5	205.5	150.2	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	3.4	59.3	171.0	753.1
1996	277.3	127.4	94.4	52.6	20.2	0.0	0.0	52.0	12.0	4.7	96.3	97.5	834.4
1997	187.9	239.2	114.6	29.3	1.0	0.0	0.0	21.8	94.9	22.6	122.0	54.9	888.2
1998	87.7	94.3	88.8	31.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	28.3	44.0	25.1	409.2
1999	132.7	170.7	240.7	73.9	19.5	0.0	0.0	11.9	6.7	92.5	1.1	71.1	820.8
2000	250.3	236.7	126.3	12.5	5.3	1.4	0.0	10.1	6.5	66.7	7.1	139.5	862.4
2001	368.5	261.5	139.3	78.2	13.1	0.0	3.5	4.7	12.1	24.5	44.5	67.8	1017.7
2002	68.9	214.8	163.0	74.8	23.6	4.6	25.9	15.0	10.9	44.3	68.8	63.0	777.6
2003	130.3	123.4	123.7	28.2	12.6	0.0	0.0	5.6	19.1	6.1	24.3	128.4	601.7
2004	228.3	145.8	71.8	22.5	0.0	1.8	11.7	43.9	6.1	0.0	14.1	61.4	607.4
2005	115.1	280.3	79.3	42.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	39.0	37.5	127.8	740.6
2006	240.8	96.5	88.3	32.7	6.3	3.4	0.0	12.9	34.0	18.7	53.5	68.6	655.7
2007	109.3	96.8	168.9	48.0	4.9	0.0	0.0	0.0	45.8	57.8	71.4	101.8	704.7
2008	190.9	105.0	73.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	2.3	35.9	15.6	147.5	575.3
2009	71.4	173.4	107.9	67.2	0.0	0.0	5.1	0.0	11.1	15.0	86.7	102.1	639.9
2010	165.0	187.4	41.4	40.6	19.0	0.0	0.0	2.6	3.4	34.3	4.1	144.8	642.6
2011	155.0	239.9	120.9	48.3	3.4	0.0	5.3	0.2	9.6	35.7	47.3	202.3	867.9
2012	203.9	286.7	160.5	94.9	0.6	0.0	0.5	9.2	83.2	18.1	69.3	229.7	1156.6
2013	246.1	175.2	66.9	24.3	6.3	26.9	18.7	17.9	0.9	17.5	82.0	191.7	874.4
2014	180.1	91.3	54.1	29.8	0.5	0.0	9.4	27.0	41.9	39.9	39.4	63.5	576.9
2015	154.5	156.1	172.1	87.7	9.7	15.0	14.6	20.2	33.2	37.0	46.2	43.2	789.5
Promedio	184.0	161.7	125.4	46.4	7.7	5.2	4.9	12.4	21.8	35.0	56.6	110.3	771.4
Máx	368.5	286.7	248.6	140.6	31.7	55.3	36.5	57.4	94.9	123.4	158.1	260.8	1254.1
Mín	66.8	36.7	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5	360.7

FUENTE: SENAMHI

Tabla 30: Precipitación estación Las Salinas (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	102.6	74.7	102.1	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3	53.9	15.3	43.9	421.6
1973	115.8	56.5	69.8	26.2	2.3	0.0	0.0	3.9	9.5	0.0	13.5	10.7	308.2
1974	57.6	72.8	34.2	23.5	5.4	12.3	0.0	55.7	2.8	0.0	0.0	23.3	287.6
1975	65.0	57.3	73.3	9.9	0.0	16.9	0.0	0.0	0.0	2.3	6.2	17.6	248.5
1976	101.1	58.0	61.3	5.0	0.0	0.0	5.5	19.0	29.8	0.0	0.0	5.4	285.1
1977	6.6	76.5	2.1	0.0	0.0	0.0	3.2	3.2	7.2	5.6	46.0	100.9	251.3
1978	86.4	14.5	46.6	50.1	0.0	0.0	4.2	1.5	0.0	4.2	46.7	13.7	267.9
1979	31.4	17.9	78.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	40.4	62.0	237.1
1980	12.8	26.5	81.4	2.0	1.5	0.0	0.0	0.0	9.5	64.8	0.0	3.8	202.3
1981	89.2	127.0	25.8	66.5	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	0.0	67.9	48.4	430.9
1982	63.4	19.6	51.7	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	54.6	40.2	12.3	272.5
1983	6.4	22.0	11.9	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	26.0	79.7
1984	163.9	125.7	179.0	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	3.7	13.3	89.4	102.7	685.6
1985	15.4	119.9	106.3	120.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	20.7	66.8	449.6
1986	71.4	62.1	94.8	32.3	6.8	0.0	2.6	5.9	0.0	0.0	0.0	66.4	342.3
1987	153.4	21.5	4.7	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.2	225.4
1988	150.8	0.0	21.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	48.3	220.7
1989	177.1	191.5	145.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	514.4
1990	103.0	25.5	40.4	0.0	16.3	36.7	0.0	5.8	0.0	0.0	82.9	110.3	420.9
1991	64.2	85.8	117.3	22.6	3.4	12.6	0.0	0.0	0.0	5.3	9.4	24.7	345.3
1992	13.9	17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	9.2	17.0	23.4	52.2	147.0
1993	87.9	71.2	58.8	11.6	0.0	0.0	0.0	7.8	0.0	3.7	0.0	50.1	291.1
1994	108.5	144.1	41.1	25.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	74.3	396.0
1995	120.4	13.8	123.5	21.3	10.1	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	7.4	25.6	328.2
1996	70.7	129.1	34.7	24.5	2.2	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	11.9	24.5	300.7
1997	83.7	181.7	97.2	19.6	1.8	0.0	0.0	15.7	33.6	0.5	19.9	50.3	504.0
1998	177.1	69.8	28.7	11.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.3	48.4	365.1
1999	53.8	187.3	140.6	38.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	10.6	7.6	24.2	468.2
2000	86.8	91.2	84.5	19.4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	5.8	0.0	56.6	345.7
2001	62.2	202.4	91.8	45.1	0.0	1.3	0.0	2.2	0.0	15.6	3.8	20.3	444.7
2002	90.1	122.3	117.2	67.1	2.7	7.3	28.4	0.0	0.0	4.5	12.2	37.2	489.0
2003	56.0	101.0	61.0	21.9	5.8	0.0	0.6	5.2	0.3	0.0	0.5	42.3	294.6
2004	109.8	92.4	38.6	29.1	0.0	0.0	22.2	2.2	1.9	0.0	0.0	14.3	310.5
2005	61.4	126.7	42.2	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	12.8	0.0	7.4	51.4	320.7
2006	97.5	66.0	164.9	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	14.0	26.4	384.3
2007	103.2	61.4	113.8	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	6.3	30.7	330.0
2008	132.1	72.0	84.4	0.0	0.0	0.4	0.0	5.4	0.0	12.2	0.0	35.6	342.1
2009	75.3	118.6	52.8	4.4	0.0	0.0	9.4	0.0	2.8	1.0	41.7	11.5	317.5
2010	35.4	86.9	33.2	10.1	3.2	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	83.0	253.0
2011	96.1	124.9	39.8	44.7	14.9	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	8.8	94.5	424.7
2012	129.2	147.0	74.1	52.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.7	0.0	85.3	508.6
2013	123.3	96.3	67.7	0.0	8.2	52.4	9.6	15.1	0.0	15.8	0.0	42.4	430.8
2014	130.0	11.4	51.1	56.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	6.6	3.1	2.8	265.5
2015	116.8	119.0	95.3	51.9	0.0	9.0	7.1	6.3	9.5	11.4	19.1	15.3	460.7
Promedio	87.7	84.3	70.1	22.7	1.9	3.6	2.1	4.1	4.1	7.9	15.9	41.5	345.9
Máx	177.1	202.4	179.0	120.0	16.3	52.4	28.4	55.7	33.6	64.8	89.4	110.3	685.6
Mín	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.7

FUENTE: SENAMHI

Tabla 31: Precipitación estación Mazo Cruz (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	156.4	110.7	110.8	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	9.2	21.4	45.4	100.0	563.5
1973	177.8	140.0	103.4	87.4	11.4	1.2	0.0	10.2	35.2	0.0	22.4	35.8	624.8
1974	341.8	173.3	84.2	19.8	0.0	0.0	0.0	79.8	7.2	1.0	19.8	53.0	779.9
1975	113.8	185.9	113.0	11.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	5.0	110.8	547.9
1976	184.8	89.6	83.6	0.0	1.8	0.0	0.0	45.4	0.0	0.0	0.0	43.6	448.8
1977	57.4	193.2	73.8	2.8	3.7	0.0	0.0	0.0	15.2	22.8	95.2	85.5	549.6
1978	209.7	48.9	68.4	47.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	2.7	87.7	74.8	541.4
1979	127.8	8.1	133.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.5	6.0	114.0	424.5
1980	61.1	45.4	137.4	10.5	0.0	0.0	0.0	9.5	28.4	54.5	18.1	23.7	388.6
1981	121.0	181.0	68.3	48.1	8.2	0.0	0.0	9.0	2.0	4.0	13.0	115.0	569.6
1982	174.0	58.0	112.0	15.6	2.7	0.0	0.4	0.0	20.4	65.0	52.0	14.0	514.1
1983	32.8	49.2	7.8	40.8	5.6	0.2	0.0	2.8	19.4	7.0	0.2	28.6	194.4
1984	241.5	314.0	238.0	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	59.2	117.6	25.8	999.7
1985	120.8	202.0	54.8	60.1	3.3	12.0	0.0	3.7	17.4	0.0	78.7	148.4	701.2
1986	154.5	303.4	221.8	12.6	0.0	0.0	2.8	3.5	0.0	0.0	82.3	138.6	919.5
1987	176.3	15.4	19.4	1.5	0.0	8.6	23.4	0.0	0.0	26.8	37.2	22.4	331.0
1988	80.4	41.9	36.0	69.9	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	0.0	45.0	295.1
1989	135.3	258.8	254.1	34.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	2.5	685.0
1990	46.3	35.7	44.8	2.5	16.9	27.4	19.6	16.9	2.2	43.7	4.1	32.4	292.5
1991	78.7	77.3	126.1	21.7	5.4	25.3	3.1	0.0	0.0	16.3	0.0	0.0	353.9
1992	53.9	45.6	1.6	4.2	0.0	0.0	0.0	8.2	0.6	32.3	23.8	35.5	205.7
1993	147.3	15.6	97.2	19.4	2.1	0.0	0.0	44.6	13.0	50.7	46.1	94.2	530.2
1994	105.0	123.3	63.1	28.1	1.8	0.2	0.3	1.7	4.1	3.4	19.0	84.4	434.4
1995	73.6	49.9	90.5	11.4	0.3	0.0	0.0	0.0	3.6	2.5	21.6	53.4	306.8
1996	177.0	88.2	29.0	19.5	13.6	0.0	0.0	14.2	0.0	1.0	34.1	102.3	478.9
1997	241.7	183.5	60.9	13.3	5.0	0.0	0.0	32.2	41.8	8.0	63.1	81.5	731.0
1998	126.8	44.2	77.0	14.2	0.0	18.6	0.0	0.6	0.4	11.6	38.1	20.8	352.3
1999	139.6	177.5	212.6	64.2	1.6	0.0	0.0	0.0	8.4	35.2	0.0	45.8	684.9
2000	179.5	135.8	64.1	22.9	6.4	1.2	0.0	1.2	0.6	28.3	7.9	82.2	530.1
2001	267.5	184.1	116.3	33.6	4.8	0.6	0.0	6.4	0.2	13.8	14.4	27.0	668.7
2002	70.4	175.4	120.3	75.6	17.0	9.2	10.0	2.2	2.0	51.1	36.3	81.1	650.6
2003	103.3	103.7	92.8	5.8	8.0	0.0	2.2	7.5	7.0	11.8	10.6	75.9	428.6
2004	142.8	118.8	82.4	16.2	0.0	0.8	26.2	59.6	12.1	0.0	0.0	41.9	500.8
2005	109.2	187.5	40.0	42.8	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	6.6	18.0	158.3	580.6
2006	271.5	118.1	109.5	26.9	11.4	0.2	0.0	0.4	5.0	37.7	57.2	94.2	732.1
2007	87.4	113.4	107.0	29.4	0.0	0.4	0.0	0.2	10.8	3.1	49.2	87.8	488.7
2008	194.4	52.7	57.9	1.4	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	6.3	3.0	132.2	454.3
2009	71.0	130.0	61.8	33.4	0.7	0.0	6.4	0.0	6.4	4.6	72.7	65.4	452.4
2010	103.5	61.4	40.6	44.2	20.5	0.0	0.0	0.0	0.8	9.4	6.3	82.4	369.1
2011	121.6	153.6	46.6	47.7	5.8	0.0	3.2	0.0	12.4	0.4	37.6	171.6	600.5
2012	183.0	174.4	87.1	73.8	0.2	0.0	0.4	3.4	0.9	7.6	36.3	142.6	709.7
2013	152.4	166.0	49.4	17.1	22.4	8.2	4.0	8.0	2.6	65.8	18.0	140.8	654.7
2014	160.5	28.2	37.0	25.5	0.0	0.0	0.0	15.4	24.6	33.0	48.8	57.4	430.4
2015	142.4	101.6	103.0	61.5	1.2	0.0	2.0	14.4	9.0	38.0	39.0	18.8	530.9
Promedio	141.3	119.6	89.5	27.9	4.4	2.7	2.4	9.3	7.8	19.1	31.5	72.5	528.0
Máx	341.8	314.0	254.1	87.4	22.4	27.4	26.2	79.8	41.8	65.8	117.6	171.6	999.7
Mín	32.8	8.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	194.4

FUENTE: SENAMHI

Tabla 32: Precipitación estación Pampa Blanca (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	1.9	0.0	0.9	0.2	0.1	1.0	4.8
1973	1.8	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4
1974	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.8	0.0	0.0	0.5	2.8
1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
1976	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.2	1.2	0.7	0.0	0.0	0.0	3.5
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	1.0	0.0	2.1
1979	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.0	0.9	3.2
1983	4.3	0.3	2.0	0.0	0.3	0.3	0.5	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	8.9
1984	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.8
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
1990	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
1992	0.0	0.0	0.0	1.3	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9
1993	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	1.0	0.0	0.0	2.4
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	1.1	0.8	0.0	0.4	2.8
1998	3.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.8
2002	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6
2007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	1.7
2008	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	2.1
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	1.2	1.2	1.8	1.1	7.8
2010	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
2011	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.8	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	3.8
2012	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.9	0.0	0.0	1.3
2013	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0
2015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	3.9	0.5	0.0	0.0	0.0	4.9
Promedio	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	1.9
Máx	4.3	5.6	2.0	1.3	2.6	2.0	2.5	3.9	1.3	1.2	1.8	1.1	8.9
Mín	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

FUENTE: SENAMHI

Tabla 33: Precipitación estación Puno (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	210.8	130.9	164.0	37.2	6.6	0.0	0.0	0.0	37.3	32.6	46.1	132.6	798.1
1973	238.2	131.7	159.1	97.6	13.3	0.0	1.8	6.1	32.5	16.4	29.8	70.8	797.3
1974	253.0	206.8	54.9	57.6	0.2	2.5	0.2	49.2	36.5	12.5	27.3	48.1	748.8
1975	157.2	177.6	158.6	37.5	43.7	0.7	0.1	6.5	48.7	53.3	24.7	235.2	943.8
1976	200.2	149.5	169.2	25.6	9.9	0.4	1.4	16.9	44.4	9.1	11.6	119.8	758.0
1977	49.1	206.1	209.8	5.8	8.8	0.0	2.3	0.0	48.1	53.9	49.7	108.8	742.4
1978	224.5	95.3	136.3	28.3	0.4	0.0	3.2	0.4	17.5	24.9	143.7	155.0	829.5
1979	131.2	35.2	143.1	44.1	1.4	0.0	0.9	1.8	8.5	45.5	31.7	83.9	527.3
1980	60.8	57.3	258.4	18.5	1.3	0.1	4.7	13.5	66.1	72.8	25.8	34.9	614.2
1981	133.9	207.3	111.3	68.9	4.7	0.0	0.0	37.8	21.1	25.6	49.0	129.0	788.6
1982	231.1	83.5	99.7	75.0	2.6	5.2	1.9	0.0	52.9	114.4	103.0	24.5	793.8
1983	20.7	70.4	57.6	55.5	14.2	2.3	1.5	4.8	46.4	26.7	29.8	104.2	434.1
1984	318.9	330.1	223.0	44.4	18.3	4.2	3.7	25.7	0.0	157.5	73.8	96.2	1295.8
1985	130.0	337.6	123.3	90.7	24.9	27.3	0.0	8.2	40.1	32.7	123.5	134.2	1072.5
1986	145.1	251.1	221.2	105.8	0.1	0.0	5.2	8.4	42.0	4.2	9.2	131.6	923.9
1987	224.3	71.5	73.8	44.2	1.7	3.8	12.5	0.0	4.3	58.4	110.8	25.4	630.7
1988	213.2	73.5	228.9	72.9	23.3	0.0	0.3	0.0	20.5	70.5	46.2	99.1	848.4
1989	203.8	130.0	137.1	100.9	0.0	0.4	1.7	14.7	17.6	14.2	21.4	42.9	684.7
1990	167.2	22.4	59.9	43.0	12.1	54.7	0.0	11.8	10.1	107.9	94.5	63.2	646.8
1991	124.1	67.7	185.8	46.2	6.8	33.6	0.0	3.0	14.7	20.4	44.2	50.3	596.8
1992	66.0	89.7	15.7	38.8	0.0	0.0	2.3	42.2	0.0	34.4	29.4	55.1	373.6
1993	175.6	100.7	107.0	52.5	6.6	1.1	0.0	37.9	18.0	69.1	79.2	111.5	759.2
1994	180.0	183.1	113.3	116.2	29.9	0.4	0.0	0.0	18.3	36.6	52.6	73.2	803.6
1995	122.7	102.8	124.0	2.1	4.1	0.0	0.0	3.0	21.9	15.3	51.4	80.2	527.5
1996	252.7	130.5	60.8	76.3	0.0	0.0	2.9	12.8	0.8	10.4	88.3	118.0	753.5
1997	239.6	213.2	98.6	88.6	1.0	0.0	0.0	21.9	108.3	30.1	62.9	44.9	909.1
1998	196.4	115.5	135.3	25.4	0.0	4.9	0.0	4.3	4.5	26.9	43.9	56.0	613.1
1999	193.1	244.8	202.0	86.0	7.5	0.0	0.0	1.9	16.1	150.3	32.0	68.4	1002.1
2000	167.1	210.0	105.1	40.3	0.4	2.3	4.2	17.9	14.6	95.8	13.9	69.0	740.6
2001	250.8	214.6	224.1	69.8	12.2	2.2	0.0	12.5	27.1	68.4	56.2	81.0	1018.9
2002	129.6	180.0	170.6	105.3	15.4	21.1	22.7	30.6	11.6	65.9	43.8	139.2	935.8
2003	174.5	114.4	114.4	46.1	36.7	4.8	0.2	9.6	42.9	25.4	8.6	131.8	709.4
2004	208.9	125.2	115.5	29.2	6.2	0.0	10.2	43.0	34.3	5.6	14.6	59.1	651.8
2005	103.3	157.9	134.6	45.7	0.4	0.0	0.0	0.0	11.8	39.5	80.5	99.4	673.1
2006	291.1	62.3	159.6	44.6	0.9	0.0	0.0	0.6	21.2	37.4	53.8	101.5	773.0
2007	84.8	171.0	236.7	49.7	10.6	0.0	3.3	1.6	61.3	77.0	44.2	74.1	814.3
2008	209.7	85.8	95.4	8.4	6.8	1.4	0.2	0.8	2.4	79.4	27.2	144.2	661.7
2009	154.0	136.1	148.3	83.0	0.4	0.0	2.5	0.0	16.4	56.4	88.9	62.5	748.5
2010	99.3	192.8	56.3	12.3	16.1	0.0	0.0	7.1	2.9	33.4	15.0	146.7	581.9
2011	122.7	202.9	116.5	46.8	4.8	0.0	6.4	0.2	45.8	25.7	48.5	151.3	771.6
2012	135.4	294.8	209.9	60.1	0.0	0.2	0.0	5.6	9.8	7.6	69.5	155.9	948.8
2013	153.0	175.8	100.0	14.3	22.4	12.5	1.5	4.5	11.6	32.9	61.4	117.1	707.0
2014	147.0	107.7	60.5	40.9	0.1	0.0	0.2	28.9	66.9	45.2	29.8	90.6	617.8
2015	96.4	121.0	187.0	114.1	0.2	0.0	1.8	4.0	54.5	41.5	23.2	59.4	703.1
Promedio	168.0	149.3	137.9	54.5	8.6	4.2	2.3	11.4	28.0	46.9	50.3	95.0	756.2
Máx	318.9	337.6	258.4	116.2	43.7	54.7	22.7	49.2	108.3	157.5	143.7	235.2	1295.8
Mín	20.7	22.4	15.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	8.6	24.5	373.6

FUENTE: SENAMHI

Tabla 34: Precipitación estación Quinistaquillas (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	63.9	48.9	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	3.3	134.9
1973	36.5	40.5	15.7	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.6
1974	45.8	9.5	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	61.4
1975	8.1	9.9	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	53.7
1976	49.3	10.3	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	69.9
1977	24.2	19.3	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	59.8
1978	29.6	0.5	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	46.7
1979	3.2	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.4	6.2
1980	1.4	12.5	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.0	20.6
1981	8.2	12.0	5.5	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	46.7
1982	0.7	16.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.3	21.1
1983	0.1	5.4	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	22.3
1984	13.2	69.7	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	6.8	28.0	20.8	145.6
1985	11.0	23.9	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	47.1
1986	68.9	33.2	1.4	0.1	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	12.4	118.0
1987	9.7	11.4	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.4
1988	2.1	60.3	0.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	65.7
1989	3.2	74.2	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.9
1990	4.0	1.1	9.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	12.3	29.6
1991	4.1	1.5	36.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	44.1
1992	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5
1993	45.5	2.0	58.1	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	1.5	114.5
1994	76.4	127.7	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	18.1	274.2
1995	12.1	0.0	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.1
1996	2.8	14.9	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	18.0
1997	22.6	78.7	17.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	15.8	0.0	0.0	10.0	148.2
1998	36.2	4.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	44.7
1999	7.0	70.7	18.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	97.2
2000	43.6	35.8	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	87.5
2001	12.3	151.9	49.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	214.0
2002	8.7	0.0	51.4	0.0	0.0	2.4	9.9	0.0	0.0	0.0	2.7	12.6	87.7
2003	1.4	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	1.9	8.2
2004	33.0	32.2	1.6	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.8
2005	69.0	19.2	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	2.5	106.4
2006	16.1	28.8	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.5
2007	14.8	7.6	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.7
2008	68.6	16.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.8	88.4
2009	2.5	17.3	5.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.0
2010	1.9	10.5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	24.0
2011	32.2	66.4	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	24.2	128.5
2012	42.6	96.0	22.0	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4	192.5
2013	27.8	43.1	11.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	89.1
2014	23.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.5
2015	12.1	32.5	59.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	104.2
Promedio	23.0	29.9	13.8	0.9	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.2	1.1	4.6	74.9
Máx	76.4	151.9	59.6	17.5	0.9	2.4	9.9	7.4	15.8	6.8	28.0	24.2	274.2
Mín	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2

FUENTE: SENAMHI

Tabla 35: Precipitación estación Ubinas (mm)

Año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Anual
1972	109.4	71.2	84.6	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	19.6	1.0	61.6	360.1
1973	177.5	133.9	104.2	40.9	0.0	0.0	0.0	6.8	18.2	1.9	3.0	2.8	489.2
1974	145.6	79.9	24.4	26.6	0.0	1.2	0.0	41.7	1.0	0.0	1.7	31.9	354.0
1975	99.6	119.2	97.9	22.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.3	429.0
1976	123.5	70.0	44.8	16.3	0.0	0.0	1.3	5.0	44.2	0.0	0.0	43.0	348.1
1977	49.6	147.6	104.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	19.2	28.0	349.6
1978	112.4	5.4	15.7	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.7	7.4	194.7
1979	65.3	8.3	84.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	5.6	39.3	214.7
1980	17.2	21.6	76.7	3.1	1.3	0.0	1.1	1.0	2.4	25.7	2.6	9.2	161.9
1981	85.9	134.8	26.1	34.7	0.0	0.0	0.0	15.7	0.5	0.0	8.5	34.4	340.6
1982	73.0	36.0	43.1	34.3	0.5	0.0	0.0	0.0	7.6	13.5	9.5	3.9	221.4
1983	1.9	13.1	10.6	5.9	1.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	21.7	64.2
1984	120.6	165.2	105.6	4.7	0.0	14.7	0.0	18.8	0.0	13.4	60.9	8.1	512.0
1985	13.4	169.3	56.3	14.3	2.8	4.9	0.0	0.0	3.4	0.0	18.6	66.5	349.5
1986	150.5	85.6	76.2	20.0	0.0	0.0	2.2	9.6	0.0	0.0	1.7	58.7	404.5
1987	173.1	32.4	3.8	0.0	0.0	0.3	13.3	0.0	0.5	12.7	0.0	0.0	236.1
1988	108.4	35.7	58.8	26.6	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	261.8
1989	44.9	104.8	49.8	45.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	249.2
1990	51.8	18.8	42.1	1.5	2.2	33.4	0.0	0.0	0.0	1.2	47.1	105.1	303.2
1991	61.2	54.9	114.3	12.6	0.0	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	13.5	284.7
1992	4.7	1.5	0.0	0.2	0.0	7.0	0.0	2.1	0.0	10.3	12.5	53.8	92.1
1993	134.2	15.8	53.0	7.1	0.0	0.0	0.0	21.1	0.0	14.0	1.5	29.1	275.8
1994	84.5	130.0	8.4	32.2	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	26.8	295.4
1995	43.3	11.9	114.9	3.1	3.4	0.0	0.0	0.0	4.5	0.3	9.3	31.1	221.8
1996	63.4	97.9	17.2	13.9	1.7	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	12.3	44.1	252.3
1997	110.0	151.3	44.4	3.5	0.0	0.0	0.5	32.0	42.5	0.0	11.7	51.7	447.6
1998	153.7	23.9	27.4	18.4	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	36.3	273.5
1999	32.4	164.9	157.1	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	16.8	0.0	24.3	437.0
2000	137.5	117.7	56.2	10.6	3.8	0.3	0.0	0.0	0.0	14.7	0.0	40.3	381.1
2001	119.5	206.7	99.8	18.3	0.1	0.5	0.0	0.6	0.0	6.9	0.0	7.4	459.8
2002	72.0	131.5	98.2	24.0	1.0	0.3	29.9	0.0	0.0	0.0	22.9	27.6	407.4
2003	39.9	62.7	45.9	6.5	13.9	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	37.6	216.5
2004	78.8	90.0	31.2	20.0	0.0	0.0	14.1	4.0	0.0	0.0	0.0	23.2	261.3
2005	67.5	101.4	32.7	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	22.6	243.8
2006	149.5	53.5	89.4	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	5.3	8.5	12.8	326.9
2007	111.5	71.6	110.3	16.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	20.7	337.0
2008	161.1	65.2	41.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	41.0	309.2
2009	33.5	99.8	49.0	14.0	0.0	0.0	6.0	0.0	6.9	0.0	7.3	5.1	221.6
2010	37.0	51.3	23.9	8.2	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	22.4	153.6
2011	126.2	196.4	11.5	76.8	14.4	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	19.6	80.6	527.3
2012	70.6	194.5	56.7	58.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	3.5	0.0	129.8	514.9
2013	146.7	93.0	59.6	0.0	19.7	9.1	7.6	9.2	0.0	4.5	0.0	24.7	374.1
2014	97.9	10.5	21.3	30.2	0.0	0.0	0.0	2.3	1.3	4.0	3.0	1.7	172.2
2015	84.3	147.3	113.3	37.8	0.0	0.0	6.8	0.9	6.3	0.0	17.1	12.3	426.1
Promedio	89.6	86.3	58.8	17.4	2.0	2.1	1.9	4.2	4.1	4.3	8.7	33.2	312.7
Máx	177.5	206.7	157.1	76.8	19.7	33.4	29.9	41.7	44.2	25.7	60.9	129.8	527.3
Mín	1.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.2

FUENTE: SENAMHI