

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS

“Índice de sequia de las cuencas del río Mashcón y del río Chonta con fines agrícolas

usando el modelo SWAT, Cajamarca 2023”

Para optar el título profesional de:

INGENIERO HIDRÁULICO

Autor:

Bach. EDUARDO RAFAEL RONCAL LIÑÁN

Asesor:

Dr Ing. LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ.

CAJAMARCA-PERÚ

2023

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: EDUARDO RAFAEL RONCAL LIÑÁN
DNI: 70205937
Escuela Profesional: INGENIERÍA HIDRÁULICA
2. Asesor: LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ
Facultad: INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: "Índice de sequía de las cuencas del río Mashcón y del río Chonta con fines agrícolas usando el modelo SWAT, Cajamarca 2023"
6. Fecha de evaluación: 13/11/2024
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 15%
9. Código Documento: oid: 3117:405258586
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 14/11/2024

 <hr/> <p>FIRMA DEL ASESOR</p> <p>Nombres y Apellidos LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ DNI: 26693344</p>	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 14/11/2024 09:22:50-0500</p> <hr/> <p>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</p>
--	--

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "ÍNDICE DE SEQUIA DE LAS CUENCAS DEL RÍO MASHCÓN Y DEL RÍO CHONTA CON FINES AGRÍCOLAS USANDO EL MODELO SWAT, CAJAMARCA 2023."

ASESOR : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0130-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 16 de abril de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veinticinco días del mes de abril de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la facultad de Ingeniería, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Vocal : Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Secretario : M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "ÍNDICE DE SEQUIA DE LAS CUENCAS DEL RÍO MASHCÓN Y DEL RÍO CHONTA CON FINES AGRÍCOLAS USANDO EL MODELO SWAT, CAJAMARCA 2023", presentado por el Bachiller en Ingeniería Hidráulica **EDUARDO RAFAEL RONCAL LIÑÁN**, asesorado por el Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :⁰⁷..... PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA :¹¹..... PTS.
EVALUACIÓN FINAL :¹⁸..... PTS. *Dieciocho* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *Aprobado* con el calificativo de *Dieciocho* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *Diece* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Presidente

Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Vocal

M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Asesor

Agradezco a mis padres Antonio Roncal y María Liñán por haberme apoyado a lo largo de mi formación profesional, de igual manera a mis hermanos Miguel y Carlos por su apoyo incondicional y finalmente a mi esposa Mirian Abanto que me apoyo en todo momento en el desarrollo de mi vida profesional

*Dedico esta tesis a la inspiración de mi vida, a mi pequeña
hijita Miryed Valery Roncal Abanto que cada una de sus sonrisas
me motivan a seguir adelante.*

*A mis padres por inculcarme valores, entre ellos el de
perseverancia y no darme por vencido cuando todo se veía difícil.*

*A mi esposa por su comprensión y apoyo durante la
realización de mi tesis.*

Eduardo Rafael Roncal Liñán

CONTENIDO

1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.1. Contextualización del problema.....	3
1.1.2. Descripción del problema.....	4
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Justificación de la investigación	4
1.3.1. Justificación Científica.....	4
1.3.2. Justificación técnica-práctica.....	5
1.3.3. Justificación Institucional y Personal.....	5
1.4. Alcances o delimitación de la investigación	6
1.5. Limitaciones	6
1.6. Objetivos:	6
1.6.1. Objetivo general.....	6
1.6.2. Objetivos específicos.....	6
1.7. Hipótesis:	7
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes de la Investigación	8
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	9
2.1.3. Antecedentes Locales.....	12

2.2.	Bases Teóricas	13
2.2.1.	Cuenca hidrográfica	13
2.2.2.	<i>Parámetros de la cuenca</i>	18
2.2.3.	Hidrología.....	21
2.2.4.	Evapotranspiración.....	28
2.2.5.	Métodos estadísticos.....	29
2.2.6.	Grupo de suelos:.....	32
2.2.7.	Modelo SWAT.....	36
2.2.8.	Balance Hidrológico.....	42
2.2.9.	Balance Hídrico Superficial.....	45
2.2.10.	Producto Grillado PISCO.	55
2.2.11.	Índice SPI Y SPEI.....	62
2.2.12.	Extensión de datos para períodos futuros	64
2.2.13.	Crecimiento de cultivos a lo largo de las distintas estaciones del año:	66
2.3.	Definición de Términos Básicos	67
2.3.1.	Topografía:	67
2.3.2.	Hidrología:.....	67
2.3.3.	Balance Hídrico:	67
2.3.4.	Modelo SWAT:.....	67
2.3.5.	Producto Grillado PISCO:.....	67
2.3.6.	Índice de Sequía:.....	68
3.	<i>CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS</i>	69
3.1.	Características Geomorfológicas e Hidrológicas la Cuenca	69
3.1.1.	Modelos de elevación digital.	69

3.2. Mapas de Uso de Suelos de la FAO.....	70
3.2.1. Cobertura Global:.....	71
3.2.2. Clasificación de Cobertura:	71
3.2.3. Resolución Espacial:	71
3.2.4. Actualización Regular:	71
3.2.5. Acceso Público:.....	71
3.3. DEM de cobertura vegetal para el análisis NDVI	72
3.4. Hidrología.....	73
3.4.1. Producto Grillado Pisco.....	73
3.5. Uso del modelo SWAT para el cálculo de los caudales máximos diarios	76
3.6. Calibración y validación del modelo:	82
3.7. Generación de caudales para la data total:	84
3.8. Balance Hídrico:.....	85
3.9. Calculo del índice de sequía:.....	91
3.10. Impacto Para Uso Agrícola De Las Sequias En Las Cuencas Del Río Mashcón Y Chonta	92
3.11. Extensión de datos para períodos futuros:	92
3.12. Materiales y Metodos:	94
4. CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	97
4.1. Parámetros de la Cuenca	97
4.1.1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Mashcón y Chonta.	97
4.1.2. Análisis de Resultados.....	99

4.2.	Datos Hidrológicos y análisis usando el producto grillado PISCO:	100
4.3.	Generación de caudales usando el Modelo Swat:	102
4.3.1.	Calibración y Validación del Modelo	104
4.3.2.	Caudales diarios generados por el modelo SWAT	107
4.3.3.	Análisis de resultados	108
4.4.	Balance Hídrico:	108
4.4.1.	BALANCE SEGÚN LA METODOLOGÍA DEL ANA:	113
4.4.2.	Análisis de resultados	115
4.5.	Índice de Sequia:	116
4.5.1.	Análisis de resultados	122
4.6.	Extensión de los resultados:	134
4.6.1.	Extensión del Balance Hídrico	134
4.6.2.	Extensión del Índice de Sequía	139
4.6.3.	Análisis de resultados	141
5.	<i>CAPÍTULO V CONCLUSIONES</i>	142
5.1.1.	Conclusión general	142
5.1.2.	Conclusiones específicas	142
6.	<i>CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES</i>	144
7.	<i>CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	145
8.	<i>CAPÍTULO VIII: ANEXOS</i>	148

Lista de Figuras

Figura. 1: Componentes de una cuenca.....	16
Figura. 2. Diagrama de Flujo: Delimitación de Cuencas Hidrográficas.....	18
Figura. 3: El Ciclo Hidrológico.....	22
Figura. 4: Sistema Hidrológico.....	22
Figura. 5: Tipos de Precipitación:.....	24
Figura. 6: Escalas térmicas utilizadas.....	25
Figura. 7: Representación del Caudal.....	25
Figura. 8: Hidrogramas de Flujo.....	27
Figura. 9: Principales componentes de evapotranspiración e intercepción.....	28
Figura. 10: Evapotranspiración.....	29
Figura. 11: Curvas Variables del Método.....	32
Figura. 12: Estructura del Modelo SWAT.....	38
Figura. 13: Esquema de desarrollo de un SIG.....	44
Figura. 14: Esquema de balance Hídrico.....	46
Figura. 15: Análisis de consistenciado (Doble masa).....	48
Figura. 16: Análisis térmico.....	49
Figura. 17: Componentes de la evapotranspiración.....	52
Figura. 18: Red de estaciones utilizadas para PISCOp.....	57
Figura. 19: Climatología de precipitación (1998-2014).....	59
Figura. 20: Coeficiente de Correlación (CC),.....	61
Figura. 21: Interfaz ASF data search.....	69
Figura. 22: Mapa de Uso de suelos de la FAO en Sudamérica.....	72
Figura. 23: Datos de cobertura vegetal EosLandviewer.....	73

Figura. 24: NCDF de temperatura, perteneciente al producto grillado Pisco.....	74
Figura. 25: NCDF de precipitación diaria, perteneciente al producto grillado Pisco.....	74
Figura. 26: Capas de NCDF, perteneciente al producto grillado Pisco.....	75
Figura. 27: Código en “R” para extraer los datos de la base de PISCO.....	76
Figura. 28: Delimitación de la cuenca con ArcSwat.	77
Figura. 29: Cobertura Vegetal usando el método NDVI.	78
Figura. 30: Mapa de uso de Suelos.....	78
Figura. 31: Numero de Curva Calculado para cada Subcuenca.	79
Figura. 32: Vista satelital de las cuencas analizadas.	79
Figura. 33: Datos para el cálculo del número de Curva.	80
Figura. 34: Datos de PISCO en Excel.	80
Figura. 35: Datos preparados para ingresar al modelo SWAT.....	81
Figura. 36: Configuración final para correr el modelo SWAT.....	81
Figura. 37: Parámetros a Calibrar del modelo SWAT.....	82
Figura. 38: Datos simulados vs datos observados.	83
Figura. 39: Datos simulados vs datos observados.	84
Figura. 40: Configuración final para la generación de datos completa.....	85
Figura. 41: Polígonos de Thiessen usando los sensores de PISCO.	86
Figura. 42: Tipos de suelos dados por la FAO para la obtención de Kc.	88
Figura. 43: Pasos para realizar la extensión AR(1) en Hidroesta2.....	93
Figura. 44: <i>Calculo de los parámetros de la serie ingresada y generada en Hidroesta2.</i>	93
Figura. 45: Vista satelital de las cuencas del Mashcón (morada) y Chonta (Roja).....	97

Figura. 46: Cuenca del río Mashcón y Chonta.	97
Figura. 47: Curva hipsométrica y frecuencia de Altitudes	99
Figura. 48: Datos de precipitación de los 14 sensores que influyen en la cuenca.	100
Figura. 49: Análisis Visual Grafico de los sensores.	101
Figura. 50: Análisis de Doble masa de los sensores.	101
Figura. 51: Resultados HRU obtenidos por SWAT.	102
Figura. 52: Datos obtenidos con SWAT en ACCESS.	103
Figura. 53: Grafico de Datos obtenidos 1988 a 1993.	103
Figura. 54: Calibración usando la estación Mashcón caudales vs datos enumerados. ...	104
Figura. 55: Validación usando la estación Jesús Túnel caudales vs datos enumerados. ...	106
Figura. 56: <i>Caudales Obtenidos mediante el modelo SWAT</i>	107
Figura. 57: Data total de caudales diarios obtenida mediante el Modelo SWAT	107
Figura. 58: Histograma de precipitación diaria en m ³ /s	109
Figura. 59: Histograma de Evapotranspiración Real en m ³ /s.	110
Figura. 60: Histograma de Caudales en m ³ /s.	111
Figura. 61: Variación del Almacenamiento ΔS diaria.	111
Figura. 62: Balance Hídrico Anual (VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO ΔS). ...	113
Figura. 63: Balance Hídrico promedio desde 1981 hasta 2026 según la metodología del ANA.	115
Figura. 64: Condición de Sequia para los 3 primeros meses desde 1981 hasta 2026. ...	118
Figura. 65: Condición de Sequia para los 6 primeros meses desde 1981 hasta 2026. ...	120
Figura. 66: Condición de Sequia para el año completo desde 1981 hasta 2016.	122

Figura. 67: Análisis de impacto en el cultivo de Manzana en la Cuenca del Mashcón y Chonta.....	132
Figura. 68: Análisis de impacto en el cultivo de Robles en la Cuenca del Mashcón y Chonta.....	132
Figura. 69: Análisis de impacto en el cultivo de Granos en la Cuenca del Mashcón y Chonta.....	133
Figura. 70: Análisis de impacto en el cultivo de Matorrales en la Cuenca del Mashcón y Chonta.....	133
Figura. 71: Análisis de impacto en el cultivo de Pinos en la Cuenca del Mashcón y Chonta.....	134
Figura. 72: Extensión de datos de Precipitación Pisco en 25 años.....	135
Figura. 73: Extensión de datos de Evapotranspiración Pisco en 25 años.....	136
Figura. 74: Extensión de datos de Caudales Calculados por el modelo SWAT en 25 años.	137
Figura. 75: Proyeccion del balance Hídrico en 25 años.	138
Figura. 76: Proyección del Índice estandarizado de Precipitación en 25 años.....	139
Figura. 77: Índice de Sequia Proyectado en 25 años.....	141
Figura. 78: Vista panorámica de la cuenca del río Chonta.....	154
Figura. 79: Vista digitalizada de la cuenca del río Grande.....	154
Figura. 80: Vista del río Grande sector Captación el Milagro.....	155
Figura. 81: Vista del río Grande	155

Índice de Tablas

Tabla 1: Valores críticos D para la prueba Kolmogorov – Smirnov.	31
Tabla 2: Grupos Hidrológicos de suelos usados por el SCS.....	33
Tabla 3: Condiciones Hidrológicas del área de drenaje según el SCS.	33
Tabla 4: Caracterización hidrológica para varios usos del suelo.....	34
Tabla 5: Numero de Curva CN para diferentes tipos de suelos.	35
Tabla 6: Coeficiente de cultivos Kc.....	51
Tabla 7: Escalas de Índice de sequía.	64
Tabla 8: Cultivos en las distintas estaciones del año.....	66
Tabla 9: Escalas de Índice de sequía.	83
Tabla 10: Coeficientes de polígonos de Thiessen.....	86
Tabla 11: Precipitaciones promedio en m ³ /d.	87
Tabla 12: Calculo del Kc promedio.....	89
Tabla 13: Evapotranspiración Real promedio en m ³ /d.	89
Tabla 14: Caudales calculados en m ³ /d.	90
Tabla 15: Balance Hídrico por día en m ³ /d.....	90
Tabla 16: Calculo del Índice de sequía mediante la metodología SPI.....	92
Tabla 17: Parámetros morfométricos de la cuenca del río Mashcón y Chonta.	98
Tabla 18: Parámetros Calibrados:.....	105
Tabla 19: Parámetros Validados:.....	106
Tabla 20: Coeficiente de Cultivo Ponderado Kc:	109
Tabla 21: Balance Hídrico Anual:	112
Tabla 22: Áreas y Cultivos de la zona.	113
Tabla 23: Asignación de Agua a Comités de la cuenca.....	114

Tabla 24: Balance hídrico promedio total según metodología del ANA.....	114
Tabla 25: Índice de sequía para los 3 primeros meses del año:.....	116
Tabla 26: Índice de sequía para los 6 primeros meses del año:.....	118
Tabla 27: Índice de sequía para el año completo:.....	120
Tabla 28: Datos de Precipitación Extendidos:.....	135
Tabla 29: Datos de Precipitación Extendidos:.....	136
Tabla 30: Datos de Precipitación Extendidos:.....	137
Tabla 31: Datos del balance Hídrico Proyectado para 25 años:	138
Tabla 32: Índice de sequía proyectado para 25 años:	140

RESUMEN

La presente investigación se centra en determinar el índice de sequía en la cuenca de los ríos Mashcón y Chonta en Cajamarca, Perú, hasta el año 2023. Teniendo como finalidad estimar el índice de sequía, recopilar y analizar datos hidrometeorológicos, determinar caudales máximos con el modelo SWAT, realizar un balance hídrico y determinar el índice de sequía.

Para ello se realizó un estudio hidrológico utilizando datos de satélites ALOS con imágenes DEM de 5 metros de resolución, también se usaron mapas de uso de suelos de la FAO y cobertura vegetal de Land Viewer. Luego, se realizó el modelamiento Hidrológico usando el modelo SWAT, con datos diarios proporcionados por el producto PISCO del SENAMHI, se realizó la Calibración con SWAT+ utilizando datos de la Estación Mashcón, y luego se realizó la validación utilizando datos de la estación Jesús Túnel. Teniendo estos datos se realizó un balance hídrico, seguido de un cálculo del índice de precipitación estandarizado (SPI) para luego calcular el Índice de Sequía. Finalmente se realiza la extensión de datos utilizando un modelo Markoviano AR(1) para proyecciones futuras.

Los resultados obtenidos de la cuenca de estudio nos dicen que tiene un área de 664.03 km² con un perímetro irregular de 134.94 km. Se identificó la variabilidad anual en los caudales, con niveles extremos en 1998 y 1992, destacando un caudal máximo de 174.4 cm³/s en 1999. Los análisis del SPI muestra notables variabilidades, con el año 2016 destacando como extremadamente seco. Finalmente se tiene la proyección del SPI que también indica variabilidad, con años extremadamente húmedos como 2021 y sequía severa o extrema en 2018, 2019, 2024, 2029, 2030 y 2035, se concluyó que el estudio proyecta condiciones de sequía moderada para el año 2023 con un SPI de -0.93.

Palabras clave: Sequía: Escasez prolongada de lluvia, Modelo SWAT: Herramienta de predicción hidrológica, SPI: Índice de sequía basado en precipitación, Calibración: Ajuste de parámetros del modelo, Validación: Evaluación de la precisión del modelo, Cuenca: Área geográfica donde converge el flujo de agua hacia un punto de salida, Caudal: Volumen de agua que fluye por unidad de tiempo en un punto específico.

ABSTRACT

This research focuses on determining the drought index in the Mashcón and Chonta river basins in Cajamarca, Peru, up to the year 2023. The objectives include estimating the drought index, collecting and analyzing hydrometeorological data, determining maximum flows with the SWAT model, conducting a water balance, and establishing the drought index.

A hydrological study was conducted using ALOS satellite data with 5-meter resolution DEM images. FAO land use maps and Land Viewer vegetation cover data were also utilized. Subsequently, hydrological modeling was performed using the SWAT model, with daily data provided by the SENAMHI's PISCO product. Calibration with SWAT+ was carried out using data from the Mashcón Station, followed by validation using data from the Jesús Túnel station. With these data, a water balance was conducted, followed by the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI) to determine the Drought Index. Finally, data extension was performed using an AR(1) Markovian model in Hidroesta 2 for future projections.

The results from the study basin indicate an area of 664.03 km² with an irregular perimeter of 134.94 km. Annual variability in flows was identified, with extreme levels in 1998 and 1992, highlighting a maximum flow of 174.4 cm³/s in 1999. SPI analyses show notable variabilities, with the year 2016 standing out as extremely dry. The SPI projection also indicates variability, with extremely wet years like 2021 and severe or extreme drought in 2018, 2019, 2024, 2029, 2030, and 2035. It is concluded that the study projects conditions of moderate drought for the year 2023 with an SPI of -0.93.

Keywords: Drought: Prolonged shortage of rainfall, SWAT Model: Hydrological prediction tool, SPI: Precipitation-based drought index, Calibration: Model parameter adjustment, Validation: Model accuracy assessment, Watershed: Geographical area where water flow converges towards an outlet point, Streamflow: Volume of water flowing per unit time at a specific point.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

A nivel mundial, las sequías son un evento climático que se repite y que impacta a diversas regiones del planeta. Los cambios en el clima y la irregularidad de los patrones meteorológicos han aumentado tanto la frecuencia como la severidad de las sequías, provocando efectos importantes en la seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico de las comunidades. (Velasco et al., 2015).

En el contexto de Perú, un país muy susceptible a los efectos del cambio climático, las sequías también se han identificado como un desafío importante. El país ha sufrido eventos de sequía frecuentes que afectan la disponibilidad de agua para la agricultura y otras actividades productivas, especialmente en regiones como Cajamarca.

En el distrito de Cajamarca, ubicado en la región del mismo nombre, las sequías impactan considerablemente a la agricultura, que es la principal actividad económica de la zona. La dependencia de los cultivos de riego y la falta de acceso a recursos hídricos permanentes convierten a la sequía en una amenaza para la seguridad alimentaria, los medios de subsistencia y el bienestar de los agricultores locales. (Sardon,2022).

Para evaluar y cuantificar la severidad de las sequías, se utilizan índices de sequía, que son herramientas estadísticas y matemáticas que permiten medir y monitorear el grado de déficit hídrico en una región determinada. Estos índices consideran variables climáticas como la precipitación, la temperatura y la humedad del suelo para determinar la magnitud y duración de una sequía.

Para evaluar y medir la severidad de las sequías, se utilizan índices de sequía, que son herramientas estadísticas y matemáticas diseñadas para monitorear y cuantificar el nivel de déficit hídrico en una región específica. Estos índices consideran factores climáticos como la precipitación, la temperatura y la humedad del suelo para determinar la extensión y duración de una sequía.

Las tecnologías más recientes para calcular índices de sequía se basan en datos satelitales y modelos climáticos avanzados. Herramientas de sensores remotos, como el MODIS (Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada) en los satélites Terra y Aqua, proporcionan información detallada sobre la vegetación, la temperatura superficial y la humedad del suelo. Esta información permite calcular índices de sequía como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Además, los modelos climáticos avanzados y los métodos de análisis de datos, que incluyen el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, mejoran el monitoreo y la predicción de las sequías con mayor precisión y en tiempo real. (PGIS, 2021)

Además, diversos proyectos e iniciativas han abordado la problemática de las sequías y han desarrollado herramientas específicas para estimar índices de sequía. Un ejemplo es el cálculo del índice de sequía utilizando la metodología del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI). Esta metodología se basa en analizar la distribución de la precipitación a lo largo del tiempo. El SPI mide la desviación estándar de la precipitación acumulada en un período determinado (por ejemplo, 3, 6 o 12 meses) y la compara con los patrones históricos de precipitación en la región. Esto ayuda a determinar si hay un déficit o exceso de precipitación en comparación con los niveles esperados. (SENAMHI, 2023).

Otro enfoque es la metodología del Índice Estandarizado de Precipitación-Temperatura (PET-PE), que combina tanto la precipitación como la temperatura para evaluar

la escasez de agua. Esta metodología fusiona el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) con el Índice Estandarizado de Evapotranspiración Potencial (PE), basado en la temperatura. Al considerar tanto la oferta de agua mediante la precipitación como la demanda de agua a través de la evapotranspiración potencial, este índice proporciona una evaluación más integral de la severidad de la sequía. Estas herramientas permiten un monitoreo y evaluación de la sequía en tiempo real, lo que mejora la planificación y gestión de los recursos hídricos en el distrito de Cajamarca,(Zúñiga, 2021).

Estos avances tecnológicos e iniciativas ponen de manifiesto la importancia de incorporar nuevas herramientas y metodologías en la estimación de índices de sequía. En el contexto de las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta en Cajamarca, es crucial investigar y aprovechar estas tecnologías y experiencias exitosas para mejorar la precisión y disponibilidad de la información sobre las sequías, lo que facilitará la toma de decisiones fundamentadas y el desarrollo de estrategias de adaptación más eficaces.

1.1.1. Contextualización del problema.

A nivel mundial, las sequías son un fenómeno climático frecuente que afecta a muchas regiones. Debido al cambio climático, su frecuencia e intensidad han aumentado, impactando negativamente la seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico de las comunidades. En Perú, un país especialmente vulnerable al cambio climático, las sequías también constituyen un desafío importante, particularmente en regiones como Cajamarca, donde la agricultura es la principal actividad económica. La escasez de acceso a fuentes permanentes de agua y la dependencia de los cultivos de riego hacen que la sequía represente una gran amenaza para la seguridad alimentaria y el sustento de los agricultores locales.

1.1.2. Descripción del problema.

En el distrito de Cajamarca, las sequías afectan de manera considerable a la agricultura. Para medir y cuantificar la severidad de estas sequías, se emplean índices de sequía, herramientas estadísticas y matemáticas que toman en cuenta variables climáticas como la precipitación, la temperatura y la humedad del suelo. A pesar de los avances tecnológicos y de herramientas como el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación-Temperatura (PET-PE), es fundamental mejorar la precisión y accesibilidad de la información sobre las sequías en el distrito de Cajamarca. La adopción de nuevas tecnologías y enfoques en la estimación de índices de sequía puede contribuir a una toma de decisiones más informada y al desarrollo de estrategias de adaptación más eficaces en esta región.

1.2. Formulación del problema

¿Las severas y extremas sequias en los años 2016, 2018, 2019 y la sequía moderada registrada en el año 2023, en las cuendas de los ríos Mashcón y Chonta, afectan las actividades productivas en la región de Cajamarca?

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación Científica

La justificación científica para tratar la problemática de las sequías en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta, en Cajamarca, se basa en llevar a cabo una investigación que siga los pasos del método científico. Esto incluye la formulación de un problema específico, la propuesta de hipótesis que serán probadas o refutadas según los resultados obtenidos mediante el procesamiento de información, y llegar a conclusiones verificables. Comprender este proceso con precisión es esencial para desarrollar estrategias efectivas de adaptación y mitigación. El uso de modelos hidrológicos avanzados y el análisis de datos de sensores

remotos proporciona una manera objetiva y actualizada de estimar el índice de sequía, lo que permite mejorar la planificación y toma de decisiones en el sector agrícola.

1.3.2. Justificación técnica-práctica

Desde una perspectiva teórico-práctica, abordar el problema de las sequías en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta requiere la aplicación de conocimientos científicos y técnicos en un contexto específico y relevante. La carencia de información detallada sobre las sequías en estas cuencas ha limitado la implementación de medidas adecuadas de mitigación y adaptación, lo que resalta la necesidad de desarrollar un estudio específico para estimar el índice de sequía. El uso de modelos hidrológicos avanzados y tecnologías innovadoras brinda una oportunidad práctica para generar información valiosa y confiable, que pueda ser aprovechada por agricultores, autoridades y otros actores involucrados en la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola.

1.3.3. Justificación Institucional y Personal.

A nivel personal, abordar la problemática de las sequías en las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta en Cajamarca representa una oportunidad valiosa para contribuir al desarrollo sostenible de mi comunidad y poner en práctica mis conocimientos en un área de importancia local. Como estudiante o profesional comprometido con el bienestar social, participar en este tipo de proyectos me permite crecer tanto personal como profesionalmente al enfrentar problemas reales y desarrollar habilidades de investigación, análisis y toma de decisiones.

Desde una perspectiva institucional, la Universidad Nacional de Cajamarca desempeña un papel crucial al respaldar y fomentar la investigación en áreas de relevancia local y regional. El apoyo a este proyecto demuestra su compromiso con el desarrollo integral de la región y su capacidad para generar conocimiento científico en beneficio de la comunidad. Los resultados de este estudio no solo tendrán relevancia local, sino que también

contribuirán al conocimiento científico global sobre la estimación y mitigación de las sequías en zonas agrícolas.

1.4. Alcances o delimitación de la investigación

La determinación del índice de sequía se realizó calculando en primer lugar los caudales máximos de las cuencas de los ríos Mashcón y Chonta en la ciudad de Cajamarca, utilizando los datos del producto PISCO, desarrollado por el SENAMHI, y validado con una estación hidrométrica ubicada dentro de la cuenca en estudio. También se empleó el modelo SWAT, el cual ha sido utilizado en diversos estudios por diferentes empresas. Posteriormente, se realizó un balance hídrico de oferta y demanda, lo que permitió finalmente calcular el índice de sequía de las cuencas mencionadas.

1.5. Limitaciones

Para el cálculo del índice de sequía se requerían datos detallados sobre la demanda de agua para riego por parte de la población y de las estaciones hidrometeorológicas. Sin embargo, se contó con una cantidad limitada de datos disponibles para realizar el trabajo.

1.6. Objetivos:

1.6.1. Objetivo general

- Estimar el índice de sequía de las cuencas del río Mashcón y del río Chonta con fines agrícolas en Cajamarca en el año 2023.

1.6.2. Objetivos específicos

- Recopilar y analizar datos hidrometeorológicos relevantes de las cuencas del río Mashcón y del río Chonta.
- Determinar los caudales máximos diarios de las cuencas utilizando el modelo SWAT.
- Realizar un balance hídrico de oferta y demanda de ambas cuencas.
- Calcular el Índice de sequía de las cuencas del río Mashcón y del río Chonta y determinar el impacto en el medio agrícola en la ciudad de Cajamarca.

1.7. Hipótesis:

La construcción de Infraestructuras de almacenamiento de agua y estrategias de conservación permiten disminuir el problema de las sequias en las cuencas del río Mashcón y Chonta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En un estudio de 2022, Mardian resalta la importancia de incorporar la escala espacial en la monitorización de la sequía y en los sistemas de alerta temprana. El estudio señala tanto los desafíos como las limitaciones de las técnicas de escalamiento, además de identificar vacíos de conocimiento que abren posibilidades para investigaciones futuras. Proporciona una visión general sobre los tipos de sequía, sus mecanismos subyacentes y los índices utilizados habitualmente. La investigación subraya la necesidad de sistemas de monitorización a múltiples escalas para informar mejor a los tomadores de decisiones sobre los impactos de la sequía, a la vez que discute las limitaciones de los índices actuales. También explora los desafíos asociados a la escala espacial en la monitorización de la sequía, cubriendo aspectos de observación, modelado y procesos a diversas escalas. Se examinan técnicas de escalamiento y se mencionan problemas comunes como el Problema de la Unidad de Área Modificable (MAUP) y la falacia ecológica. Además, el estudio enfatiza la importancia de adaptar los modelos de sequía a diferentes escalas, aunque se reconoce que los métodos óptimos para lograrlo aún no están claros.

En 2022, Paulo de Sousa Oliveira realizó un estudio cuyo principal objetivo fue predecir el uso del suelo en la subcuenca del Alto Río Grande (ARG), ubicada en el sureste de Brasil, para el año 2030. Esta región fue seleccionada debido a la alta demanda de sus recursos hídricos y a la reciente escasez de agua causada por sequías prolongadas y una gestión deficiente de dichos recursos. Para alcanzar este objetivo, se empleó la metodología del Land Change Modeler (LCM) para proyectar los

cambios en el uso del suelo. Los resultados de este análisis fueron incorporados al modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), previamente calibrado y validado según las condiciones ambientales y climáticas específicas de la región. El estudio reveló que, para 2030, se espera un aumento notable en la cobertura de bosques y pastizales, mientras que las áreas agrícolas se reducirán, debido a eventos climáticos como intensas lluvias y deslizamientos ocurridos en 2011 que alteraron el paisaje. Estos cambios en el uso del suelo impactarán de forma significativa la disponibilidad de agua, ya que, bajo condiciones de precipitación similares, el modelo SWAT predice una reducción de hasta el 59% en los caudales pico y hasta un 63% en los caudales mensuales promedio para el 2030, en comparación con el uso del suelo registrado en 2017. En consecuencia, este estudio enfatiza la importancia de una gestión adecuada de los recursos hídricos y contribuye al desarrollo de estrategias para mejorar la seguridad hídrica en la región, resaltando la necesidad de considerar el uso del suelo como un factor clave en la disponibilidad de agua y en los desafíos futuros.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En 2021, Montes llevó a cabo una investigación cuyo propósito fue estimar índices de sequía utilizando datos de teledetección en la cuenca del río Ichu. Se aplicaron las metodologías de los índices SPI y SPEI en distintas escalas temporales, utilizando datos mensuales de precipitación y temperaturas máximas y mínimas derivados del producto satelital PISCO, desarrollado por SENAMHI – Perú. El estudio validó los datos satelitales al compararlos con observaciones meteorológicas, confirmando su fiabilidad. Se analizaron eventos significativos de sequía en la cuenca del río Ichu y se proyectaron posibles sequías futuras hasta el año 2100, previendo un aumento en los eventos de sequía, especialmente a partir de 2070,

afectando principalmente a la región 2. Estas conclusiones son fundamentales para la gestión de los recursos hídricos en la región.

En 2017, Ortiz Vásquez llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fue caracterizar las sequías en la cuenca Puyango-Tumbes, una región que enfrenta una creciente demanda de agua y problemas de sequía. Esta caracterización se considera fundamental para servir de base en el desarrollo de proyectos y soluciones de gestión del agua en la zona. La metodología empleada integró múltiples parámetros climatológicos e hidrológicos, incluyendo el índice de flujo base (BFI) y el índice de precipitación estandarizada (SPI). El BFI se calculó mediante cuatro técnicas de separación de caudal base: una gráfica (UKIH) y tres digitales con distintas constantes de recesión, estableciendo límites para identificar sequías hidrológicas. Para el cálculo del SPI, se utilizó un registro histórico de 29 estaciones meteorológicas en la región y, tras la regionalización de las precipitaciones, se completaron los vacíos en las series históricas mediante un vector regional. Se aplicó el SPI en ventanas de 3, 6, 9 y 12 meses en cada estación. Los resultados de los análisis indican que la cuenca Puyango-Tumbes ha experimentado sequías de moderadas a extremas. Estas sequías fueron contrastadas y caracterizadas mediante el BFI y el SPI, proporcionando una comprensión más detallada de la magnitud y naturaleza de las sequías en la región. Estos hallazgos son clave para abordar los problemas de sequía en la cuenca y guiar el desarrollo de proyectos y soluciones enfocados en la gestión de los recursos hídricos en un contexto de creciente demanda de agua y cambio climático.

En 2020, Gutiérrez Cori realizó un estudio enfocado en analizar las sequías en la cuenca amazónica del Perú, específicamente en la cuenca Puyango-Tumbes, una región con creciente demanda de agua y problemas relacionados con la sequía.

Esta caracterización es fundamental como base para el desarrollo de proyectos y soluciones en la gestión del agua en la zona. La metodología incluyó varios parámetros climatológicos e hidrológicos, como el índice de flujo base (BFI) y el índice de precipitación estandarizada (SPI). El BFI se calculó utilizando cuatro técnicas de separación de caudal base: una gráfica (UKIH) y tres digitales, cada una con distintas constantes de recesión, estableciendo umbrales para identificar las sequías hidrológicas. Para el cálculo del SPI, se utilizaron datos históricos de 29 estaciones meteorológicas en la región, y tras la regionalización de las precipitaciones, se completaron los vacíos en las series históricas con un vector regional. El SPI se aplicó en ventanas de 3, 6, 9 y 12 meses en cada estación. Los resultados del análisis revelaron que la cuenca Puyango-Tumbes ha experimentado sequías que van desde moderadas hasta extremas. Estas sequías fueron comparadas y caracterizadas mediante el BFI y el SPI, proporcionando una comprensión más clara de su magnitud y características. Estos hallazgos son esenciales para enfrentar los desafíos de sequía en la cuenca y guiar el desarrollo de proyectos y estrategias para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente ante el aumento de la demanda de agua y los efectos del cambio climático.

En un estudio presentado por Cairapoma en 2021, el objetivo principal fue caracterizar los eventos de sequía en la cuenca del río Mantaro mediante un enfoque bivariado, reconociendo la complejidad del fenómeno y la importancia de considerar las correlaciones entre variables. Se emplearon datos de precipitación mensual de 43 estaciones meteorológicas, agrupados en zonas homogéneas y siguiendo una metodología detallada. El proceso incluyó un análisis de homogeneidad y tendencias en las series de datos, seguido de la aplicación del método Box-Jenkins para generar series sintéticas de precipitación a lo largo de 500 años. Se calcularon los índices de

precipitación estandarizados (SPI-3 y SPI-12), identificando variables clave como frecuencia, duración, severidad e intensidad de las sequías. El análisis se abordó desde dos perspectivas: univariada y bivariada. En el enfoque univariado, se evaluaron siete distribuciones, mientras que en el bivariado se utilizaron tres cópulas para captar las correlaciones. Se calcularon los períodos de retorno univariados y bivariados para evaluar la probabilidad de sequías. Los resultados indicaron que, en las cuencas Baja, media Este y media Oeste, los eventos de sequía moderada tuvieron períodos de retorno bivariado inferiores a 10 años, mientras que, en la cuenca Alta, estos fueron inferiores a 20 años. Para sequías severas (SPI-12), las cuencas Baja y media Este mostraron mayores probabilidades de ocurrencia, con períodos de retorno menores a 20 años, mientras que en las cuencas media Oeste y Alta, los períodos de retorno superaron los 20 años.

2.1.3. Antecedentes Locales

En la cuenca del Alto Jequetepeque, Carrasco realizó un estudio en 2018 en el que se identificaron sequías extremas, severas, moderadas y normales, siendo las más extremas registradas en las estaciones meteorológicas de San Juan y Magdalena. En la estación de San Juan, se detectó una sequía extrema de 13 meses de duración y un déficit hídrico de 15,44 durante el período 1984-1985, según el análisis del SPI. En la estación de Magdalena, se observó una sequía extrema con una duración de 9 meses y un déficit de agua de 12,4 durante el período 1996-1997, basado en el análisis del SPEI.

El artículo publicado por Solís en 2017 se basa en los resultados de un estudio realizado en la ciudad de Cajamarca. Este estudio, llevado a cabo en el marco de las actividades meteorológicas y climatológicas de la Dirección Zonal 03 del SENAMHI Cajamarca - La Libertad como parte del Plan Operativo 2017, tuvo como objetivo

analizar la relación entre la variabilidad climática y la aparición de sequías en la región de Cajamarca durante el período 1987-2016. Se analizaron los datos mensuales de temperatura y precipitación de las planillas climatológicas de la Dirección Zonal. Las sequías se definieron como dos meses consecutivos con anomalías de precipitación del -20% en la temporada lluviosa (octubre-abril). Los resultados ofrecen información valiosa sobre la frecuencia e impacto de las sequías en la región, contribuyendo al conocimiento de la climatología local y proporcionando una base para futuras investigaciones atmosféricas en Cajamarca. Se confirmó que las sequías son eventos recurrentes que a veces afectan a toda la región y no solo a algunas provincias. Se estudió la relación entre la variabilidad climática y las sequías, utilizando datos de temperatura y precipitación para identificar patrones y tendencias. Las conclusiones indican una correlación entre las variaciones térmicas y pluviométricas en diferentes zonas, observándose que algunas provincias experimentan temperaturas extremas coincidentes con años secos y fenómenos como "El Niño" y "La Niña". Se identificaron años con sequías regionales, y se estableció que ciertas provincias presentan una alta relación entre la variabilidad climática y la ocurrencia de sequías. A partir de estos hallazgos, se desarrollaron lineamientos de política y un plan de contingencia para mejorar la capacidad de respuesta ante sequías en la región.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Cuenca hidrográfica

Una "**cuenca hidrográfica**" es un área geográfica en la que todas las aguas de escorrentía fluyen hacia un punto común, generalmente un río principal, lago u océano. La delimitación de una cuenca se basa en los límites topográficos que separan las áreas de drenaje. Las cuencas son fundamentales en la hidrología, ya que permiten analizar el flujo

de agua, calcular la precipitación y entender cómo interactúan el agua y el terreno. Las cuencas también tienen un papel importante en la gestión de recursos hídricos y la planificación del uso de la tierra.

El término "**área de la cuenca**" se refiere a la extensión geográfica desde la cual fluye el agua hacia un río principal o cuerpo de agua. (Bateman, 2017) en su libro "Hidrología aplicada", esta área es crucial en hidrología para comprender cómo se recoge y fluye el agua en una cuenca hidrográfica. La delimitación de esta área implica identificar los límites geográficos que definen la región que contribuye al flujo de agua hacia el punto de interés. Este concepto es esencial para calcular el flujo de agua, predecir eventos como crecidas y sequías, y tomar decisiones en la gestión de recursos hídricos.

El "**perímetro de la cuenca**" se refiere a la longitud total de la línea que marca los límites geográficos de una cuenca hidrográfica. En términos simples, es la distancia alrededor del contorno de la zona que drena agua hacia un río principal o cuerpo de agua. Esta medida es relevante en hidrología y geomorfología para evaluar la forma y extensión de la cuenca, lo que a su vez influye en la forma en que el agua fluye y se acumula en la región. La medición del perímetro de la cuenca implica trazar la línea que sigue los límites de la cuenca en un mapa topográfico. Esta medida ayuda a comprender la geometría de la cuenca, lo que puede ser útil para analizar patrones de escurrimiento, calcular tasas de flujo y comprender cómo los eventos climáticos afectan el flujo de agua, (Bateman, 2017).

La "**longitud del cauce principal**" se refiere a la distancia total a lo largo de la línea que sigue el curso del río principal en una cuenca hidrográfica. Es la medida de la longitud del río principal desde su fuente hasta su desembocadura en un lago, océano u otro cuerpo de agua. Esta medida es esencial para comprender la longitud del trayecto que sigue el agua a medida que fluye por la cuenca. La medición de la longitud del cauce principal implica

trazar una línea a lo largo del curso del río en un mapa topográfico. Esta medida es importante en hidrología para calcular la velocidad del flujo de agua, el tiempo que lleva recorrer el río y la cantidad de agua que puede transportar. Además, puede influir en la erosión y sedimentación a lo largo del río y en su capacidad para transportar sedimentos, , (Bateman, 2017).

La "**pendiente del cauce principal**" se refiere al cambio vertical en la elevación a lo largo del recorrido del río principal en una cuenca hidrográfica. Esta medida refleja la inclinación del terreno por donde fluye el río, desde su nacimiento hasta su desembocadura. La pendiente es un factor clave que influye en la velocidad del flujo de agua y la erosión del lecho del río.

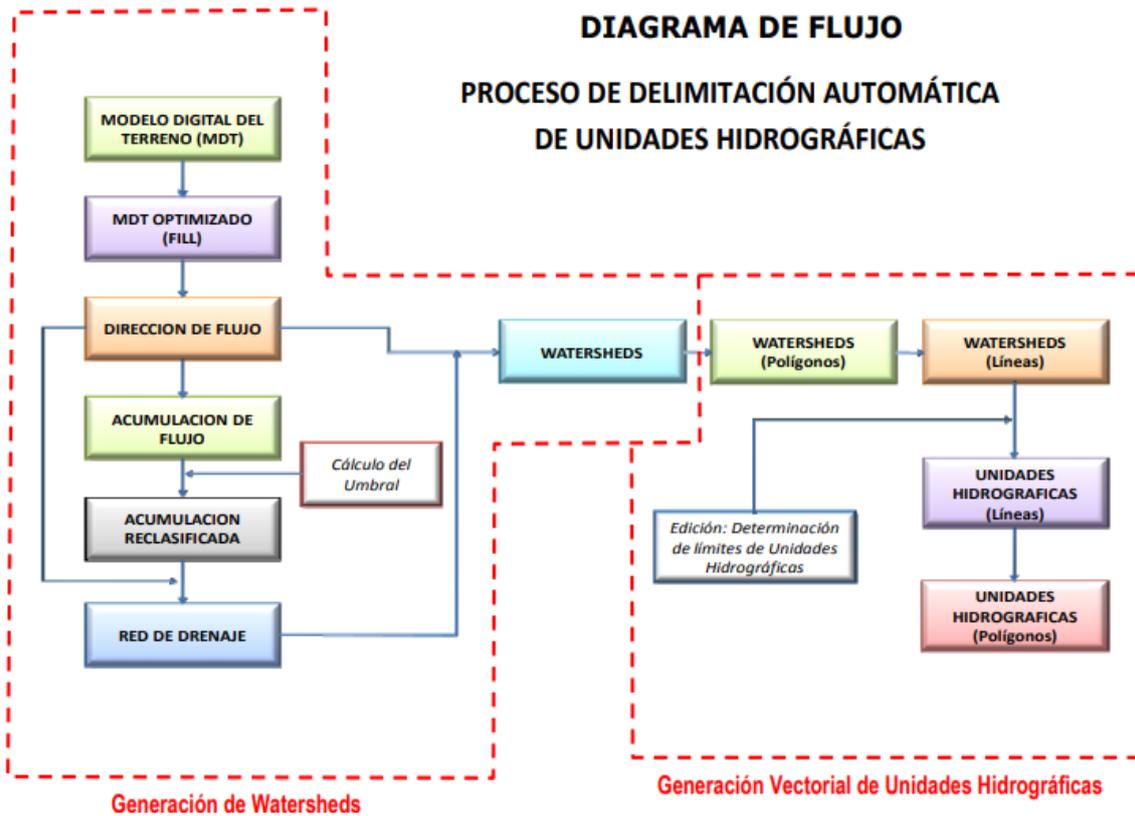
La medición de la pendiente se realiza calculando la diferencia de elevación entre dos puntos a lo largo del cauce principal y dividiendo esa diferencia por la distancia horizontal entre ambos puntos. Esto resulta en la cantidad de elevación ganada o perdida por cada unidad de distancia horizontal. Una pendiente más pronunciada indica un terreno más inclinado, lo que usualmente se traduce en un flujo de agua más rápido y mayor erosión.

En hidrología, la pendiente del cauce principal es importante para entender cómo fluye el agua y cómo interactúa con el terreno circundante. Una pendiente pronunciada puede aumentar el riesgo de inundaciones repentinas y erosión severa, mientras que una pendiente más suave permite un flujo de agua más controlado y menor erosión, (Bateman, 2017).

- **Acumulación de Flujo:** Es una matriz que muestra el peso acumulado de todas las celdas que fluyen hacia una celda específica. Las celdas con alta acumulación identifican la red de drenaje, mientras que aquellas con acumulación cero marcan puntos más altos del terreno.
- **Stream Link:** Asigna valores únicos a las secciones de una red de drenaje entre intersecciones, donde los enlaces son las secciones que conectan confluencias.
- **Watershed:** Se refiere al área que contribuye al flujo de un conjunto de celdas hacia un colector común, también llamada cuenca de captación o zona de contribución.

Este método emplea un enfoque matemático para procesar Modelos Digitales de Elevación, calculando direcciones de flujo, acumulación de flujo y enlaces de corriente, lo que permite delimitar cuencas hidrográficas. Esta información es vital para comprender cómo fluye el agua en una región.

Figura. 2. Diagrama de Flujo: Delimitación de Cuencas Hidrográficas.



Fuente: (BATEMAN, 2018)

2.2.2. Parámetros de la cuenca

2.2.2.1. Forma de la cuenca.

La morfología superficial de una cuenca hidrográfica es muy relevante debido a su impacto en el tiempo de concentración, el cual se define como el tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya al flujo en una sección específica desde el inicio de una lluvia. En otras palabras, este tiempo refleja el intervalo que el agua tarda en desplazarse desde los límites de la cuenca hasta su salida. Aunque las cuencas de grandes ríos suelen adoptar una forma parecida a una pera, las cuencas más pequeñas pueden tener configuraciones muy variadas, dependiendo de su composición geológica.

Existen varios indicadores que se utilizan para evaluar la forma de las cuencas, buscando asociarlas con figuras geométricas conocidas. Por ejemplo, el coeficiente de

compacidad se relaciona con un círculo, mientras que el factor de forma se compara con un rectángulo. (Marcelo Villarroel, 2020).

2.2.2.2. Coeficiente de Compacidad

Conocido como índice de Gravelius (K_c), este coeficiente mide la relación entre el perímetro de una cuenca y la circunferencia de un círculo con la misma área que la cuenca.

Este valor adimensional, el coeficiente de compacidad, varía en función de la forma de la cuenca, sin importar su tamaño. Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será este coeficiente. Un valor mínimo, equivalente a uno, indicaría que la cuenca tiene una forma circular. Si todos los demás factores fueran iguales, un coeficiente cercano a uno indicaría una mayor tendencia a generar mayores caudales en la cuenca. (Marcelo Villarroel, 2020).

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

K_c = índice de Gravelius (adimensional)

P = Perímetro de la cuenca (Km)

A = Área del círculo igual a área de la cuenca (Km²)

2.2.2.3. Factor de forma

El factor de forma (K_f) indica la relación entre el ancho medio y la longitud axial de una cuenca. La longitud axial (L) se mide siguiendo el recorrido más largo del agua, desde la desembocadura hasta la fuente más lejana de la cuenca. El ancho medio se calcula dividiendo el área de la cuenca entre su longitud axial.

El factor de forma es un índice adicional que indica la propensión de una cuenca a experimentar crecidas. Una cuenca con un factor de forma bajo tiene una menor probabilidad

de inundaciones en comparación con otra de igual tamaño pero con un factor de forma más alto.(Ramón, 2018).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

K_c = índice de formas (adimensional)

A = Ancho medio (Km)

L = Longitud axial de la cuenca (Km)

2.2.2.4. Sistema de drenaje.

El sistema de drenaje en una cuenca abarca el cauce principal y sus tributarios. Analizar su ramificación y desarrollo es clave, ya que indica la rapidez con la que el agua se evacúa de la cuenca hidrográfica. (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.2.5. Pendiente de la cuenca

La inclinación del terreno en una cuenca es un factor clave para la velocidad de la escorrentía superficial. Esto afecta directamente el tiempo que tarda el agua de lluvia en llegar a los cauces que componen la red de drenaje. Los picos de crecida, la capacidad de infiltración del suelo y su susceptibilidad a la erosión dependen de la velocidad de la escorrentía en la superficie de la cuenca. (Ramón et al., 2018).

2.2.2.6. Elevación media de la cuenca

La inclinación de la cuenca es un factor clave en la velocidad de la escorrentía superficial, lo que a su vez afecta el tiempo que tarda el agua de lluvia en acumularse en los cauces de la red de drenaje. Los picos de crecida, la capacidad de infiltración del suelo y su susceptibilidad a la erosión dependen de la velocidad con la que el agua escurre en el terreno de la cuenca.(Ramón et al., 2018).

$$E = \frac{\sum ea}{A} \quad (3)$$

E = Elevación media.

e = Elevación media entre dos curvas de nivel consecutivas

a = Área entre 2 curvas de nivel.

A = Área total de la cuenca.

2.2.2.7. Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica es una representación gráfica del relieve promedio de una cuenca. Muestra la variación de la elevación en diferentes zonas de la cuenca en relación con el nivel del mar. Esta variación se visualiza mediante un gráfico que indica el porcentaje del área de drenaje que se encuentra por encima o por debajo de ciertas altitudes. En resumen, la curva hipsométrica brinda información sobre la distribución de las elevaciones en toda la cuenca. (Ramón et al., 2018).

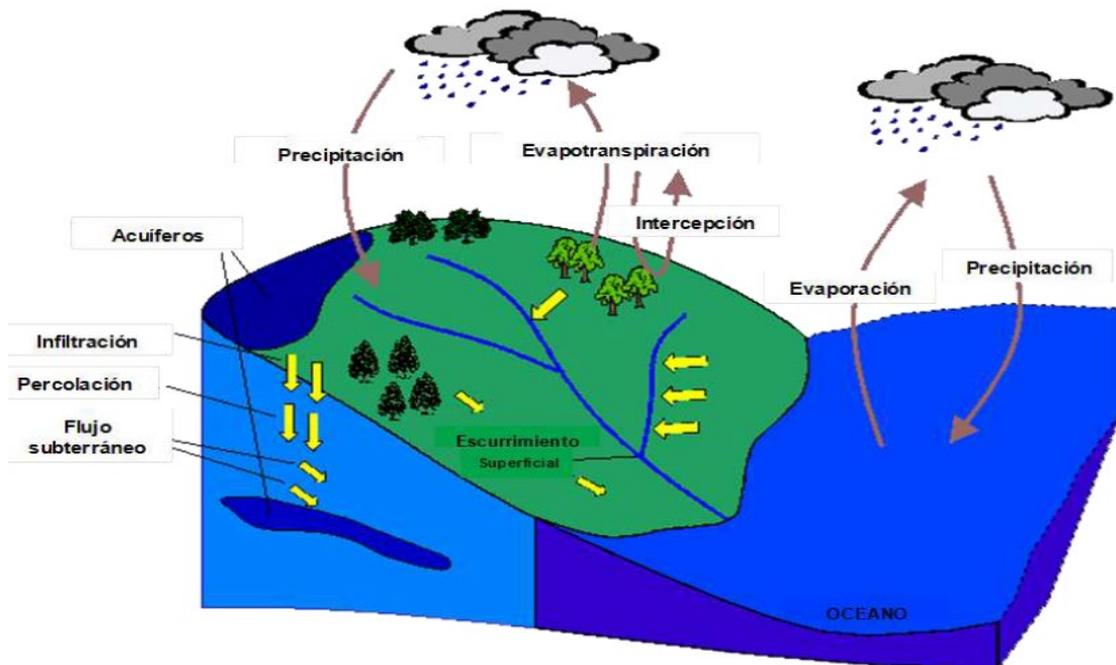
2.2.3. Hidrología

2.2.3.1. El Ciclo Hidrológico:

El ciclo hidrológico es el conjunto de fases que el agua atraviesa al moverse de la tierra a la atmósfera y regresar a la superficie terrestre. Comprende la evaporación desde el suelo, los océanos o cuerpos de agua, la condensación en nubes, la precipitación, la acumulación en el suelo o masas de agua, y la reevaporación.

Este ciclo recirculante es un proceso continuo, impulsado por dos fuerzas principales: el sol, que proporciona la energía necesaria para la evaporación del agua, y la gravedad, que provoca que el agua condensada caiga a través de la precipitación y el escurrimiento. El ciclo hidrológico abarca los cambios que el agua experimenta en la naturaleza, tanto en sus estados (sólido, líquido y gaseoso) como en sus formas (superficial, subterránea, etc.). (Gálvez, 2019)

Figura. 3: El Ciclo Hidrológico.

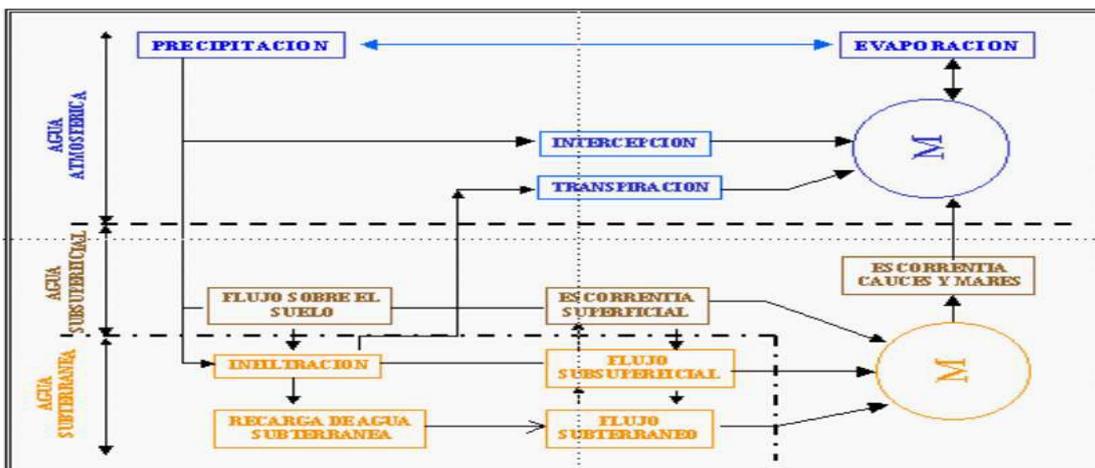


Fuente: (BATEMAN, 2018)

2.2.3.2. Sistema hidrológico:

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, por lo que no se pueden conocer por completo. No obstante, a falta de una comprensión perfecta, pueden ser representados de manera simplificada mediante el uso del concepto de sistema. (Novoa, 2011).

Figura. 4: Sistema Hidrológico.



Fuente: (BATEMAN, 2018)

2.2.3.3. Año Hidrológico:

Un período continuo de doce meses se selecciona de manera que los cambios en el almacenamiento de agua sean mínimos, reduciendo así al mínimo el excedente de un año al siguiente. En Perú, el año hidrológico comienza en septiembre y finaliza en agosto del año siguiente. (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.3.4. Precipitación

La precipitación hace referencia a toda el agua atmosférica que cae sobre la superficie terrestre, ya sea en estado líquido (como la lluvia o la llovizna), en estado sólido (como la nieve o el granizo), o en forma de precipitaciones ocultas, como el rocío y la helada blanca. Estas precipitaciones se producen debido a variaciones en la temperatura o la presión y constituyen la principal fuente de entrada al sistema hidrológico continental. (SENAMHI, 2022).

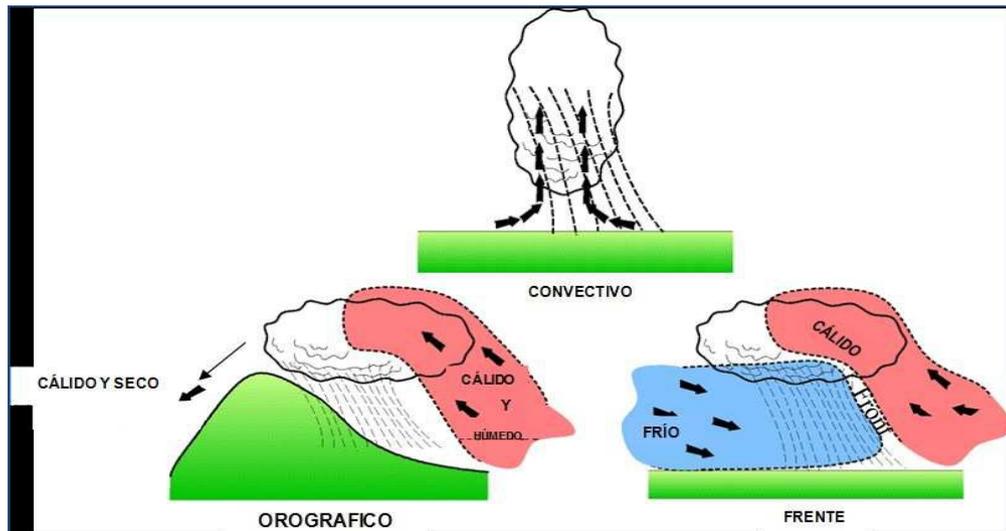
Para que se forme la precipitación, es necesario que el vapor de agua atmosférico se condense, lo cual solo ocurre cuando el aire alcanza la saturación. La saturación es una condición fundamental para que se produzca la condensación.

Los diferentes procesos termodinámicos que permiten que las partículas atmosféricas no saturadas lleguen a la saturación y se condensen incluyen:

- Saturación y condensación isobárica (a presión constante),
- Saturación y condensación por presión adiabática,
- Saturación y condensación debido a la presión de vapor de agua,
- Saturación por mezcla y turbulencia.

Existen varios tipos de precipitación, como la precipitación convectiva, orográfica y las precipitaciones frontales, como se muestra en la figura a continuación.

Figura. 5: Tipos de Precipitación:



Fuente: (BATEMAN, 2018)

Precipitación Convectiva: Ocurre debido al rápido ascenso de las masas de aire en la atmósfera. Este tipo de precipitación es generalmente tormentosa, de corta duración (menos de una hora), con alta intensidad y cubre un área reducida (Marcelo Villarroel, 2020).

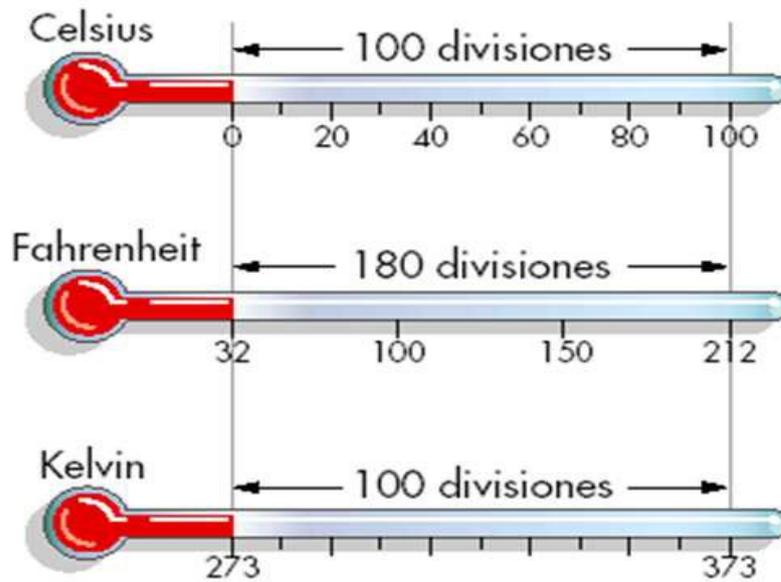
Precipitación Orográfica: Como indica su nombre (del griego oros = montaña), está asociada a la presencia de barreras topográficas. La precipitación orográfica se caracteriza por su intensidad y frecuencia regulares (Novoa, 2011).

Precipitación Frontal o Ciclónica: Se refiere a los frentes, que se asocian a la interacción entre la temperatura de la masa de aire y la humedad. (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.3.5. Temperatura

La cantidad de energía solar que el aire retiene en un momento determinado se llama temperatura, y su principal factor es la radiación solar. El termómetro es el instrumento confiable para medir esta cantidad de energía. La medición debe realizarse a 1,5 metros del suelo, en un lugar bien ventilado y protegido de la luz directa del sol. Los resultados se expresan en la escala centígrada o Celsius, o en grados Fahrenheit. (Figura 6), (Marcelo Villarroel, 2020)

Figura. 6: Escalas térmicas utilizadas



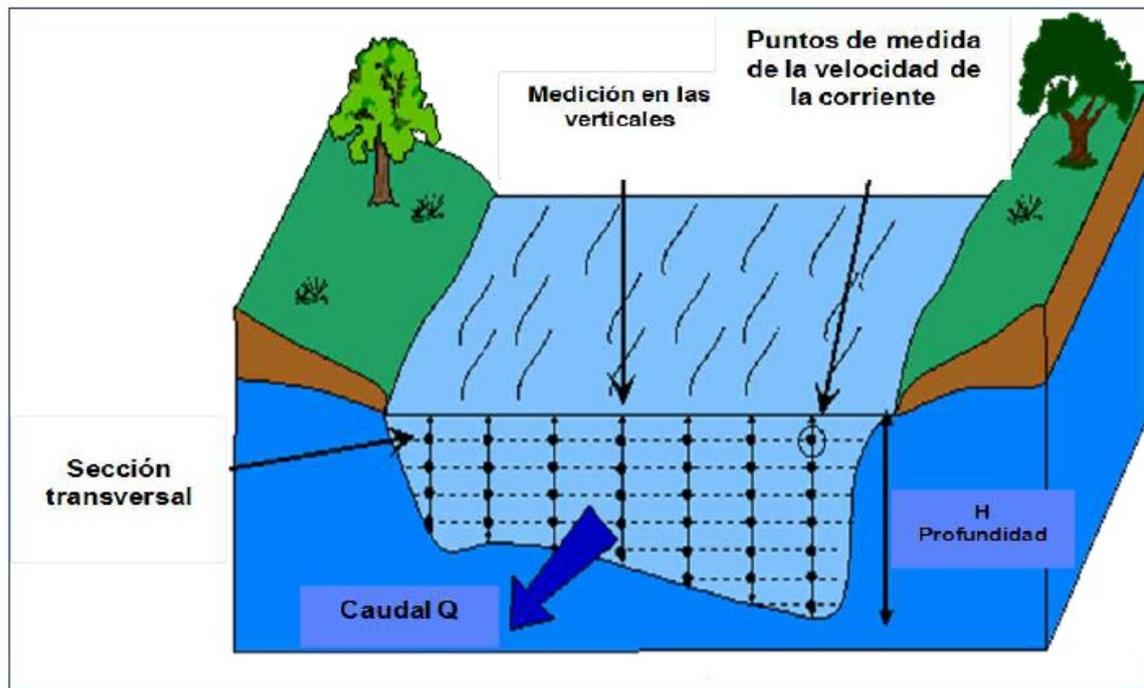
Fuente: (Marcelo Villarroel, 2020)

No obstante, existen tres factores climáticos que causan variaciones en la temperatura: la altitud, la latitud y la cercanía al mar. Además, los movimientos de rotación y traslación de la Tierra también tienen una influencia en los cambios térmicos.

2.2.3.6. Caudal.

Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo, tal como se aprecia en la Figura 7.

Figura. 7: Representación del Caudal.



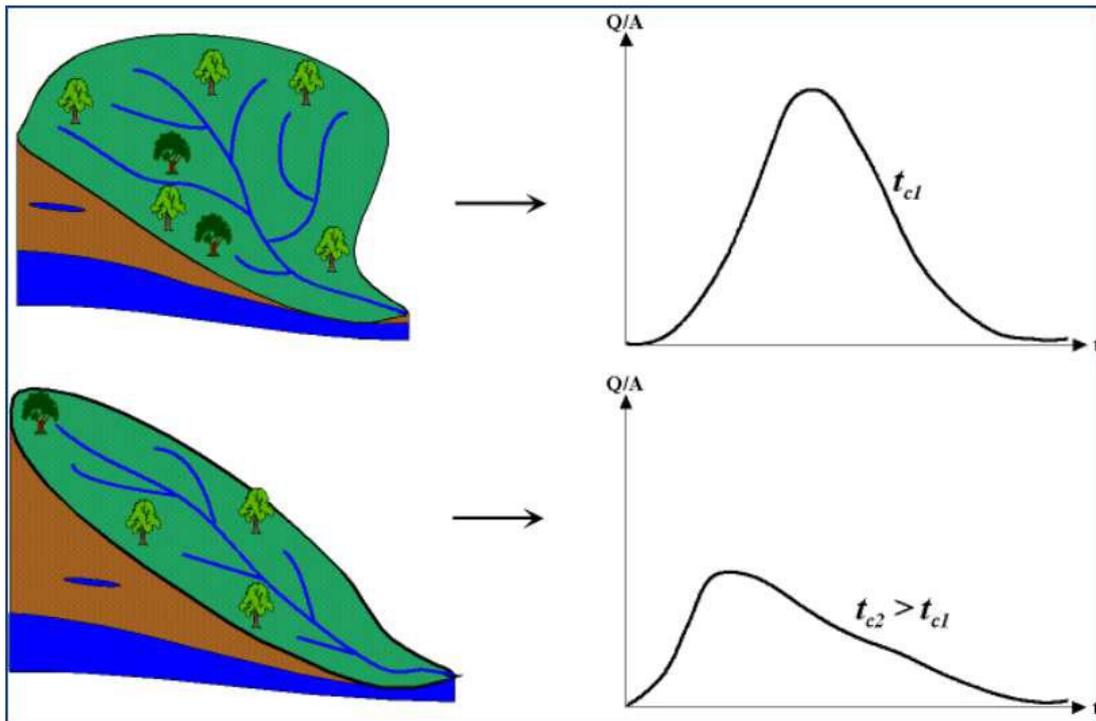
Fuente: (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.3.7. Hidrograma

El hidrograma de caudal es una representación gráfica o tabular de la variación del flujo en función del tiempo en un punto específico de una corriente. Este gráfico integra las características fisiográficas y climáticas que influyen en la relación entre la lluvia y la escorrentía en una cuenca de drenaje particular, permitiendo visualizar cómo varía el caudal de un río a lo largo del tiempo.

El hidrograma está determinado por las precipitaciones que ocurren en la cuenca y sus características físicas, como se ilustra en la figura, donde se comparan dos hidrogramas según la forma de la cuenca. En este caso, una mayor pendiente genera una respuesta más rápida en el hidrograma, (Marcelo Villarroel, 2020)

Figura. 8: Hidrogramas de Flujo.



Fuente: (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.3.8. Evaporación

La evaporación es un proceso físico en el que un fluido se transforma en vapor o gas y se integra al aire. Aunque no es completamente conocido, es parte del ciclo hidrológico. (Figura 9) , (Marcelo Villarroel, 2020)

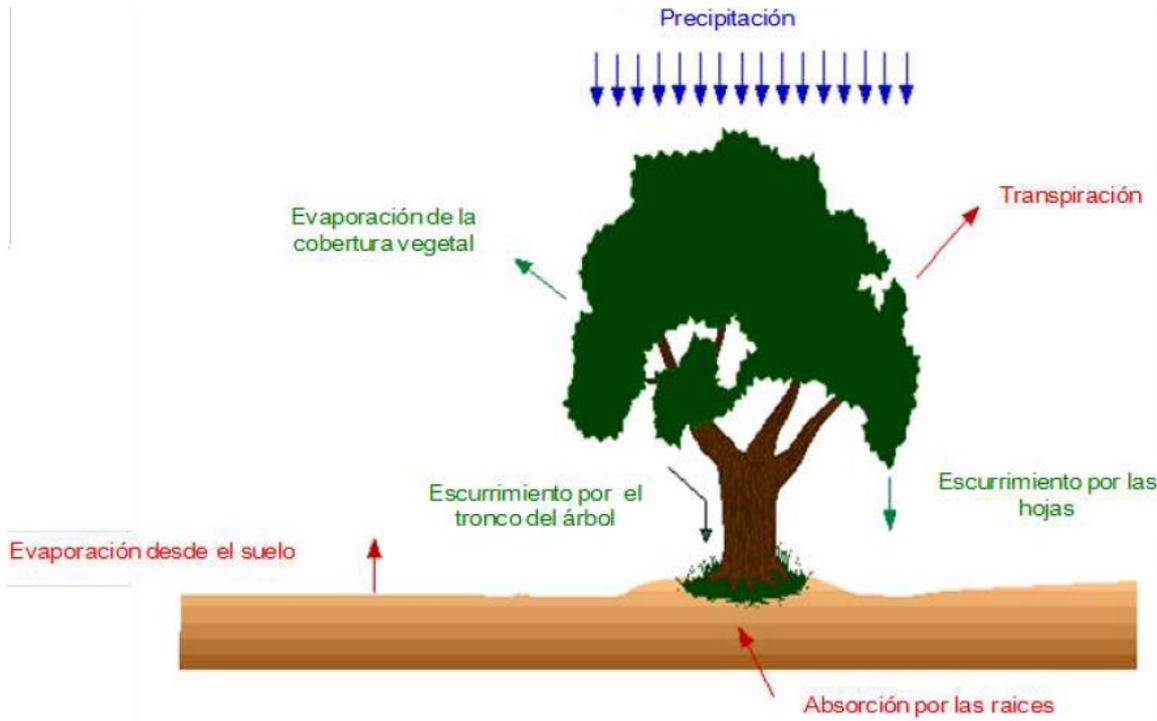
2.2.3.9. Transpiración

La transpiración es la evaporación que ocurre a través de las hojas. El proceso de alimentación de las plantas se realiza al transportar agua con nutrientes a través de ellas, y este movimiento es posible gracias a la transpiración , (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.3.10. Intercepción

La intercepción es la parte de la precipitación que es retenida por elementos como la vegetación o los techos (Figura 9). Parte de esta agua nunca llega al suelo, ya que se adhiere a estas superficies, las humedece y se evapora, (Marcelo Villarroel, 2020)

Figura. 9: Principales componentes de evapotranspiración e interceptación



Fuente: (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.4. Evapotranspiración.

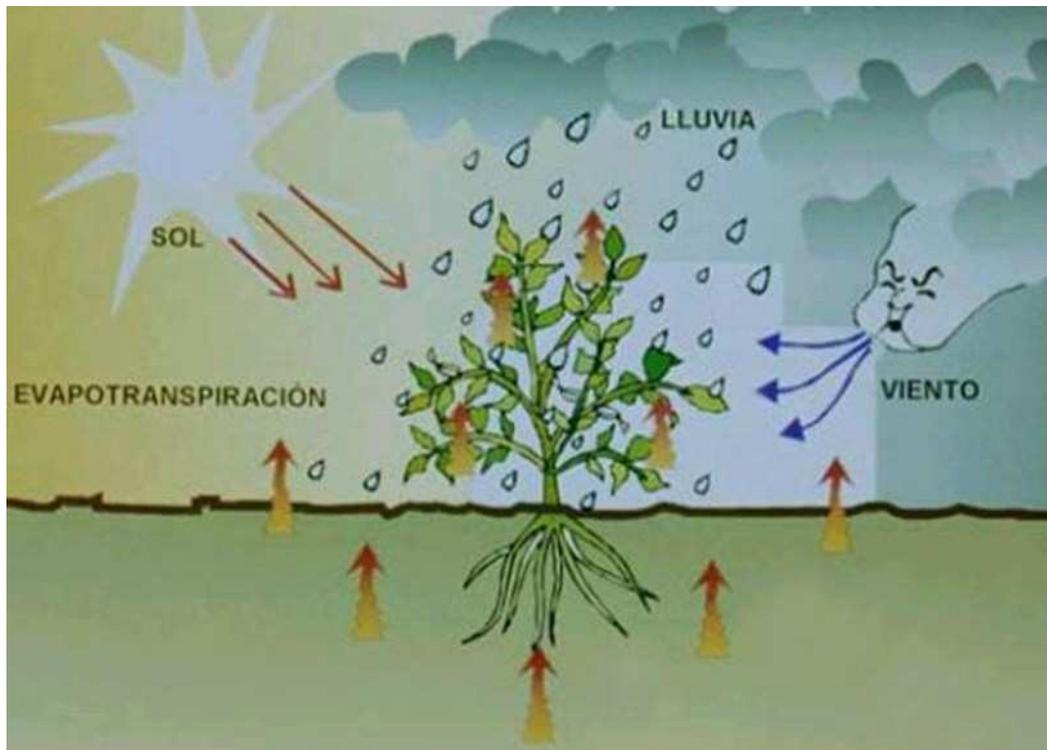
La evapotranspiración es un proceso fundamental dentro del ciclo hidrológico, que implica la pérdida de agua de la superficie terrestre hacia la atmósfera. Está compuesta por dos componentes principales: la evaporación y la transpiración.

Además de estos componentes, en hidrología se considera un proceso adicional llamado "intercepción", que consiste en la retención temporal de agua en la vegetación antes de llegar al suelo o evaporarse directamente. La intercepción es especialmente relevante en zonas boscosas o con vegetación densa.

La evapotranspiración es esencial para la distribución del agua en la Tierra y tiene un impacto directo en el ciclo del agua, el clima, la disponibilidad de recursos hídricos y la salud de los ecosistemas. Su análisis y cuantificación son clave para la gestión eficiente de

los recursos hídricos, así como para la planificación en áreas como la agricultura, la gestión de cuencas y la predicción climática, (Marcelo Villarroel, 2020)

Figura. 10: *Evapotranspiración.*



Fuente: (Marcelo Villarroel, 2020)

2.2.5. Métodos estadísticos.

Los métodos estadísticos se basan en la existencia de series de datos de caudales en el lugar de interés, que son analizados utilizando técnicas tradicionales de análisis de frecuencias (basadas en la observación de eventos anteriores). Esto implica que la curva de frecuencia definida para un lugar específico es válida solo para ese sitio. Sin embargo, cuando se necesita información en otro lugar donde no hay datos medidos, la regionalización de datos permite combinar información de diferentes puntos de la cuenca o región, generando una curva de frecuencias regional válida para toda la zona, incluyendo lugares sin datos. Este enfoque está limitado a períodos de retorno de hasta 100 años. Las

distribuciones de probabilidad más utilizadas en el análisis de avenidas máximas en hidrología incluyen:

- Distribución Log-Normal de 2 Parámetros
- Distribución Log-Normal de 3 Parámetros
- Distribución de Valor Extremo Tipo I o Distribución Gumbel
- Distribución Log-Gumbel
- Distribución Pearson Tipo III
- Distribución Log-Pearson Tipo III

2.2.5.1. Test de Kolmogorov-Smirnov

El test de Smirnov-Kolmogorov, conocido también como la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), es una herramienta estadística no paramétrica utilizada para comparar una muestra con una distribución de referencia (prueba univariada) o para comparar dos muestras entre sí (prueba bivariada). A continuación, se mencionan sus características principales:

$$F_n = \frac{m}{n + 1} \quad (4)$$

Donde:

- F_n : frecuencia acumulada observada.
- m : número total de órdenes.
- n : número total de datos.

Se ha trabajado con un nivel de confianza del 95% (0,95), por lo que el nivel de significancia Alfa (α) es 0,05, que representa la probabilidad de cometer un error tipo I (rechazar una hipótesis verdadera). La estadística “D” se define de la siguiente forma: (Moraguez-Iglesias., 2019)

$$D = \text{Sup}|F_n(x)_i - F(x)_i| \quad (5)$$

Posteriormente, al asumir un valor de significancia, se consulta la tabla de valores críticos de D en la prueba de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Teniendo en cuenta el tamaño de la muestra, se determina que: Si $D < D_{\text{tabla}}$, se acepta que el ajuste es adecuado con el nivel de confianza establecido.

Tabla 1: Valores críticos D para la prueba Kolmogorov – Smirnov.

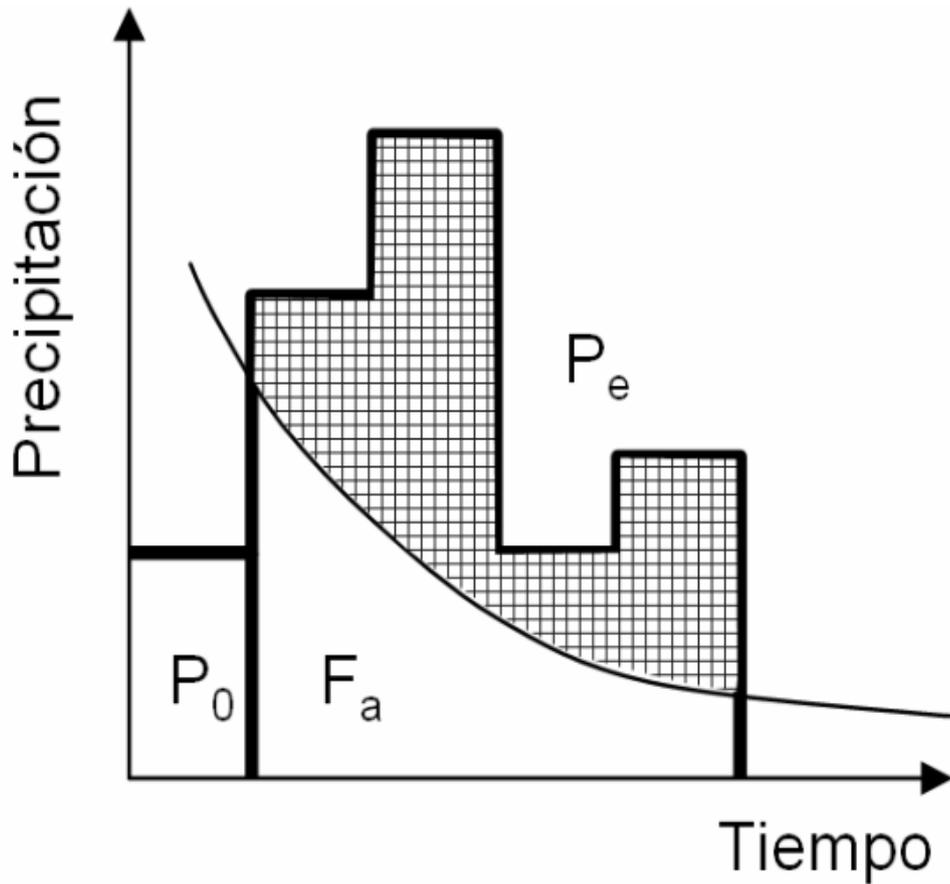
Tamaño de la muestra	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.47
15	0.3	0.34	0.4
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
35	0.2	0.22	0.27
40	0.19	0.21	0.25

Fuente: (Aparicio Mijares, 2018)

2.2.5.2. Método de la Curva Número SCS

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación durante una tormenta. La profundidad del exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe) siempre es menor o igual a la profundidad total de precipitación (P). Asimismo, una vez que comienza la escorrentía, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca (Fa) es menor o igual a una retención máxima potencial (S). Existe una cantidad de precipitación inicial (Ia), llamada abstracción inicial, que no genera escorrentía. Por lo tanto, la escorrentía potencial es igual a $P - Ia$. (Aparicio Mijares, 2018)

Figura. 11: Curvas Variables del Método



Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

Para escoger el número de curva, se necesitan los siguientes datos:

2.2.6. Grupo de suelos:

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS), tomando en cuenta las características texturales de más de 3000 suelos, los clasificó en cuatro grupos según sus características hidrológicas para producir escurrimiento, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Grupos Hidrológicos de suelos usados por el SCS.

Grupo de suelos	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye áreas profundas con muy poco limo y arcilla: también suelo permeable con grava en perfil. Infiltración Básica de 8-12 mm/h
B	Suelos con Moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando Húmedo. Infiltración básica 4-8 mm/h
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla. Pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de la saturación. Infiltración básica 1-4 mm/h
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados. Infiltración básica menor a 1mm/h

Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

2.2.6.1. Condiciones hidrológicas del área de drenaje:

Este indicador de la cobertura vegetal y su variación depende de la densidad de la cobertura, por lo que se agrupa en los siguientes tres grupos:

Tabla 3: Condiciones Hidrológicas del área de drenaje según el Servicio de Conservación de Suelos.

Condición Hidrológica	Cobertura
Buena	> 75%
Regular	50% - 75%
Mala	< 50%

Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

2.2.6.2. Uso del suelo

Como la vegetación es clasificada de acuerdo con su porte, el tipo de vegetación influye en la condición hidrológica y ella varía con el uso del terreno como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Caracterización hidrológica para varios usos del suelo.

Uso del Suelo	Condición Hidrológica
Pastos Naturales	Pastos en condiciones malas, dispersos, fuertemente pastoreados con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal. Pastos en condiciones regulares moderadamente pastoreados con la mitad, o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. Pastos en buenas condiciones, ligeramente pastoreados y con más de las tres cuartas partes del área total de la cubierta vegetal
Áreas Boscosas	Áreas en condiciones malas, tienen arboles dispersos y fuertemente pastoreados sin crecimiento rastrero. Áreas de condiciones regulares, son moderadamente pastoreadas y con algo de crecimiento. Áreas buenas, están densamente pobladas y sin pastorear.
Pastizales Mejorados	Pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo. Son considerados como buenas condiciones hidrológicas.
Rotación de Praderas	Praderas densas, moderadamente pastoreadas, usadas en una bien planeada rotación de cultivos y praderas consideradas como que están en buenas condiciones hidrológicas. Áreas con material disperso, sobre pastoreado son consideradas como malas condiciones hidrológicas.
Cultivos	Condiciones Hidrológicas buenas se refieren a cultivos los cuales forman parte de una buena rotación de cultivos (cultivos de escarda, praderas, cultivos tupidos). Condiciones hidrológicas malas se refiere a cultivos manejados basándose en monocultivos.

Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

Finalmente, se selecciona el número de curva CN que se ajusta a las condiciones del área en estudio. En caso de que existan diferentes tipos de terrenos, el número de curva CN puede calcularse según el porcentaje que representa cada tipo de área y luego calcular un promedio. Estos números de curva se obtienen mediante el cuadro siguiente Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

Tabla 5: Numero de Curva CN para diferentes tipos de suelos.

Uso del suelo	Cobertura		Grupos de suelos			
	Tratamiento o Practica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Suelos en descanso	Surcos Rectos		77	80	91	94
Cultivos de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Terraza y curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Terraza y curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Terraza y curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Terraza y curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Terraza y curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de Corte		Buena	30	58	71	83

Bosque	Mala	45	66	73	79
	Regular	36	60	70	77
	Buena	25	55	87	89
Caminos de tierra	Buena	72	82	87	89
Caminos pavimentados	Buena	74	84	90	92

Fuente: (Prieto Villarroya et al., 2018)

2.2.7. Modelo SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS-USDA). SWAT es un modelo de simulación hidrológica a nivel de cuenca, utilizado para predecir el impacto de las prácticas de uso de la tierra y manejo del suelo en la calidad del agua y el flujo en las cuencas hidrográficas. Fue desarrollado en colaboración con varias agencias e instituciones de investigación y se ha utilizado ampliamente a nivel mundial para evaluar y gestionar los recursos hídricos y la calidad del agua en cuencas (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

El Sistema de Simulación de Agua y Tierra (SWAT) es un modelo hidrológico ampliamente empleado en la investigación de cuencas rurales. SWAT integra características de varios modelos de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (ARS) y se desarrolló como una evolución del modelo SWRRB1. Entre los modelos que influyeron en su desarrollo se encuentran CREAMS2, GLEAMS3 y EPIC4, los cuales aportaron componentes clave para la simulación de procesos en cuencas hidrográficas (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

El desarrollo inicial de SWRRB se basó en la modificación del modelo de hidrología diaria de lluvias de CREAMS, al que se le realizaron mejoras para aumentar su capacidad y precisión. Sin embargo, para grandes cuencas se requería su división en subcuencas y la combinación de varios resultados, lo que llevó al desarrollo de ROTO para facilitar el enrutamiento de flujos. Finalmente, SWRRB y ROTO se fusionaron en el modelo SWAT,

lo que permitió simular áreas extensas manteniendo las características valiosas del modelo original. (Soil and Water Assessment Tool, 2018)

Desde su desarrollo, SWAT ha pasado por numerosas mejoras y ampliaciones en sus funcionalidades, como la incorporación de opciones de gestión, mejoras en la simulación de la calidad del agua, la inclusión de ecuaciones más precisas para la evapotranspiración y la simulación de diversos procesos hidrológicos y ambientales. Además, se han creado interfaces de usuario para facilitar su uso en distintas plataformas de software, y SWAT ha sido utilizado en estudios y aplicaciones a nivel mundial. (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

2.2.7.1. Descripción del modelo SWAT

El Sistema de Simulación de Agua y Tierra (SWAT) es una herramienta que permite simular una variedad de procesos físicos dentro de una cuenca hidrográfica. Estos procesos se dividen en dos fases principales: la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico y la Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

En la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico, la cuenca se divide en sub-cuencas o sub-vertientes, lo cual es útil cuando diferentes áreas están influenciadas por distintos tipos de suelos o usos de la tierra, afectando la hidrología. Cada sub-cuenca cuenta con información de entrada organizada en categorías como clima, unidades de respuesta hidrológicas (HRUs), estanques/humedales, agua subterránea, canal principal y drenaje. Las HRUs representan áreas con combinaciones únicas de cobertura de tierra, tipo de suelo y pendiente (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

La simulación hidrológica se divide en dos fases principales:

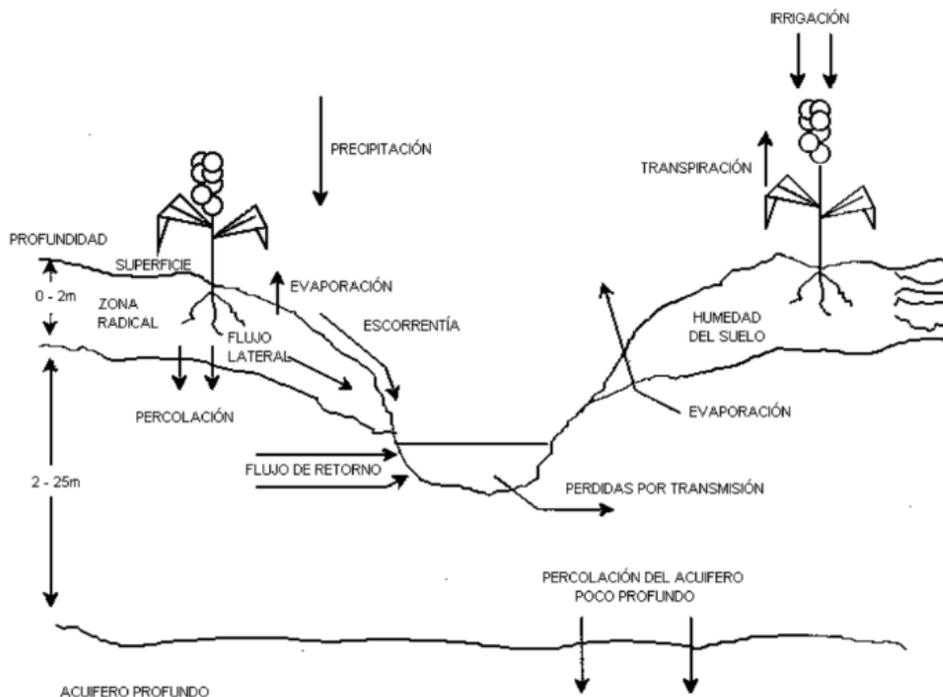
Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico: En esta fase se controla el agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que llegan al canal principal de cada sub-cuenca, teniendo en cuenta

la cobertura del suelo, el tipo de suelo, la pendiente y el clima (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico: Aquí se modela el movimiento de agua, sedimentos y otros elementos a través de la red de canales hacia el punto de salida, considerando la topografía y geometría de los canales, así como los estanques y humedales presentes (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

SWAT es una herramienta potente para modelar y comprender los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica, permitiendo a investigadores y profesionales realizar análisis detallados de cómo los factores naturales y humanos influyen en el flujo de agua, la erosión y la calidad del agua en distintas partes de la cuenca. Para obtener más detalles sobre los procedimientos de simulación, se puede consultar el manual teórico de SWAT en <http://swatmodel.tamu.edu/>.(Soil and Water Assessment Tool, 2018).

Figura. 12: Estructura del Modelo SWAT.



Fuente: (Soil and Water Assessment Tool, 2018)

La Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico en SWAT se fundamenta en la ecuación del balance hídrico, que estima el contenido de agua en el suelo en función de varios procesos.

La ecuación es la siguiente:

$$Sw_t = Sw_0 + \sum(R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (6)$$

Donde:

- Sw_t : es el contenido de agua en el suelo al final del día "t" (mm H₂O).
- Sw_0 : es el contenido de agua en el suelo al inicio del día "i" (mm H₂O).
- t: representa el tiempo en días.
- R_{day} : es la cantidad de precipitación en el día "i" (mm H₂O).
- Q_{surf} : es la cantidad de escorrentía superficial en el día "i" (mm H₂O).
- Ea : es la cantidad de evapotranspiración en el día "i" (mm H₂O).
- W_{seep} : es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en el día "i" (mm H₂O).
- Q_{gw} : es la cantidad de flujo de retorno en el día "i" (mm H₂O). Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día "i" (mm H₂O).

Para realizar esta simulación, la cuenca hidrográfica se divide en sub-cuencas o sub-vertientes, lo que permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para diferentes tipos de suelos y cultivos. Las escorrentías se calculan de manera independiente para cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU), y luego se suman para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto proporciona una descripción más precisa del equilibrio hídrico en la cuenca (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

El clima es un factor crucial en esta fase, ya que proporciona las entradas de humedad y energía que controlan el ciclo hidrológico. SWAT requiere datos climáticos diarios que incluyen precipitación, temperatura máxima/mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Estos datos pueden ser proporcionados mediante registros observados o generados durante la simulación (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

SWAT utiliza un generador de clima basado en promedios mensuales para generar los datos climáticos. Este generador crea conjuntos de datos para cada sub-cuenca, y los valores se generan de manera independiente para cada una. Se emplean modelos matemáticos específicos para generar precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

Además, el modelo considera la cobertura y el derretimiento de la nieve, la temperatura del suelo y otros factores que influyen en el balance hídrico de la cuenca. La profundidad de la nieve, la temperatura del suelo y otros parámetros se calculan para cada banda de elevación dentro de la cuenca, lo que permite una evaluación detallada de las diferencias climáticas y sus efectos en el ciclo hidrológico.

El flujo de retorno, El flujo de retorno, o flujo base, en SWAT se refiere al volumen de agua subterránea que proviene del manto freático. SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: uno superficial y libre, que contribuye al flujo de retorno hacia los cuerpos de agua dentro de la cuenca, y otro acuífero profundo y confinado, que aporta al flujo de retorno hacia cursos de agua fuera de la cuenca. El agua que se filtra más allá de la zona de raíces se divide en dos fracciones, cada una destinada a recargar uno de los acuíferos. Además de alimentar el flujo de retorno, el agua del acuífero superficial puede reponer la humedad del suelo en condiciones de sequía o ser absorbida directamente por las plantas. (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

En cuanto a la cobertura de tierra y el crecimiento de las plantas, SWAT utiliza un único modelo para simular diferentes tipos de cobertura de suelo. Este modelo distingue entre plantas anuales y perennes. Las plantas anuales crecen desde la siembra hasta la cosecha o hasta que se acumulen las unidades de calor necesarias. Las plantas perennes mantienen sus sistemas radiculares durante todo el año, entrando en estado de latencia durante el invierno y reanudando su crecimiento cuando la temperatura diaria promedio

supera un umbral determinado. Este modelo de crecimiento de plantas se emplea para estimar la extracción de agua y nutrientes de la zona de raíces, la transpiración y la producción de biomasa. (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

El crecimiento potencial de la biomasa en un día específico se define como el aumento que ocurriría bajo condiciones óptimas de crecimiento. Este crecimiento potencial diario de biomasa depende de la cantidad de energía solar interceptada y de la eficiencia de la planta para convertir esa energía en biomasa. La energía interceptada se estima en función de la radiación solar y del índice de área foliar de la planta. (Soil and Water Assessment Tool, 2018).

2.2.7.2. Ecuaciones de transformación Lluvia - Escorrentía del modelo SWAT

El modelo SWAT utiliza un método racional modificado para calcular el índice de pico de escorrentía, que representa el flujo máximo de escorrentía durante un evento de lluvia determinado. Este índice es esencial para predecir la pérdida de sedimentos y el potencial erosivo de una tormenta. A continuación, se explica el método racional modificado utilizado por SWAT:

- **Método Racional Modificado**

El método racional es ampliamente usado en el diseño de sistemas de drenaje y gestión de aguas pluviales. Supone que la intensidad de la lluvia (i) comienza en $t=0$ y continúa indefinidamente, con el flujo de escorrentía aumentando hasta el tiempo de concentración ($t=t_{conc}$), cuando toda el área de la subcuenca contribuye al flujo de salida.

- **Fórmula Racional**

La fórmula racional básica para calcular el índice de pico de escorrentía es:

$$Q_{pico} = C \cdot i \cdot A \quad (7)$$

Donde:

- Q_{pico} es el índice de pico de escorrentía (m^3/s).

- C es el coeficiente de escorrentía, que varía entre 0 y 1 según las características del suelo y el uso de la tierra.
- i es la intensidad de la lluvia (mm/h o in/h).
- A es el área de la subcuenca (km² o acres).

- **Fórmula del Índice de Pico de Escorrentía en SWAT**

SWAT utiliza la siguiente fórmula para calcular el índice de pico de escorrentía:

$$Q_{pico} = C \cdot i \cdot A \cdot 360 \quad (8)$$

Donde:

- Q_{pico} es el índice de pico de escorrentía (m³/s).
- C es el coeficiente de escorrentía ajustado para las condiciones de la cuenca.
- i es la intensidad de la lluvia (mm/h).
- A es el área de la subcuenca (km²). El factor 360 ajusta las unidades para obtener el índice de pico de escorrentía en m³/s.

- **Cálculo del Coeficiente de Escorrentía**

El coeficiente de escorrentía en SWAT se calcula para cada tormenta, representando la proporción de lluvia que se convierte en escorrentía superficial. Este coeficiente indica cuánta precipitación se transforma en escorrentía. La ecuación es:

$$C = \frac{Q_s}{R_d} \quad (9)$$

donde:

C es el coeficiente de escorrentía.

Q_s es la escorrentía superficial (mm de agua).

R_d es la lluvia diaria (mm de agua).

2.2.8. Balance Hidrológico

El desarrollo de un balance hídrico superficial requiere la recopilación de una amplia variedad de datos que abarcan aspectos cartográficos, edafológicos, biológicos y

meteorológicos. Estos datos son esenciales para comprender y modelar el comportamiento del agua en el suelo y en la cuenca hidrográfica. A continuación, se especifican los tipos de información requeridos: (SENAMHI, 2022).

2.2.8.1. Información cartográfica, edafológica y biológica:

Información cartográfica: Incluye datos convencionales obtenidos en el campo, como la topografía, la cobertura del terreno (vegetación), la ubicación de ríos y cuerpos de agua, y otros elementos geográficos relevantes. También se emplea información derivada de la teledetección, obtenida mediante imágenes satelitales, que permite mapear características del terreno, como la vegetación y la geomorfología.

Suelos: Para llevar a cabo un balance hídrico superficial, es fundamental comprender tanto los procesos que sigue el agua en el suelo como las características fisiográficas, edafológicas y biológicas del área en estudio. Por ello, una evaluación precisa del balance hídrico está estrechamente ligada a la cantidad y calidad de la información disponible, en especial a los datos proporcionados por las redes de estaciones y los años de registros. (SENAMHI, 2022)

Información biológica: Abarca datos sobre la vegetación presente en la cuenca, la cobertura vegetal, la evapotranspiración de las plantas y otros factores biológicos que influyen en el ciclo del agua. Para obtener esta información, se realizan estudios de campo y se utilizan tecnologías de percepción remota, como imágenes satelitales, que permiten generar mapas detallados de la cuenca y sus características.

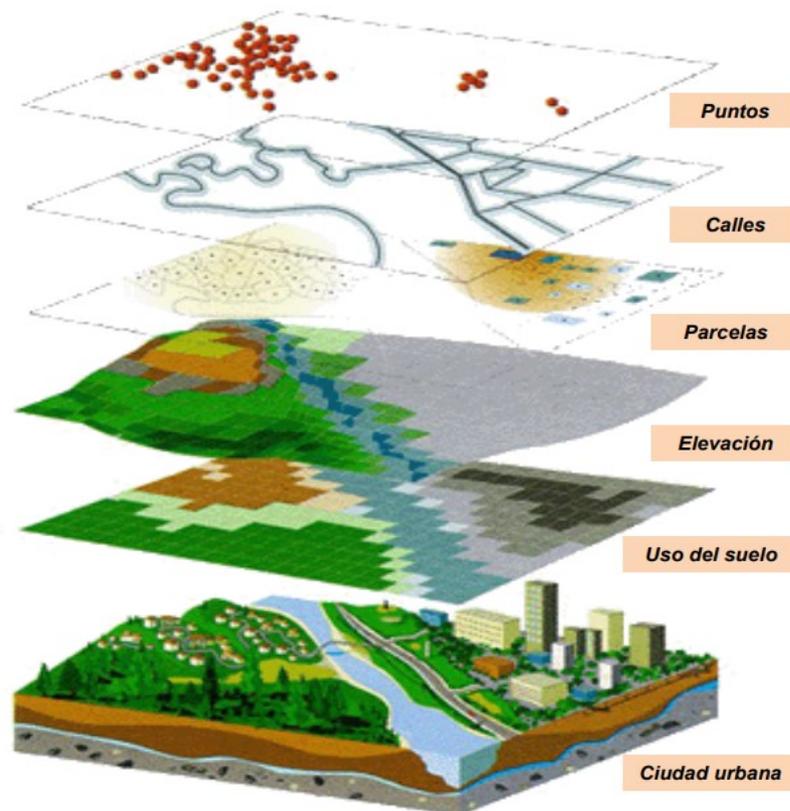
2.2.8.2. Información hidrometeorológica:

Datos meteorológicos: Estos datos incluyen información sobre precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Son esenciales para comprender las condiciones climáticas de la cuenca y su impacto en el ciclo hidrológico. (SENAMHI, 2022)

Período de cálculo: El período para calcular el balance hídrico depende de factores como la superficie y la topografía de la cuenca, los parámetros hídricos a analizar y la disponibilidad de datos de las estaciones meteorológicas. Los balances pueden realizarse a diferentes escalas temporales, como horas, días, meses, estaciones o años completos. Los balances anuales son comunes para simplificar el cálculo del balance medio de agua. (SENAMHI, 2022)

La disponibilidad y calidad de esta información son fundamentales para obtener un balance hídrico preciso y comprender cómo el agua fluye a través de la cuenca. Estos datos se emplean en modelos hidrológicos para estimar la cantidad de agua que entra, sale o se almacena en la cuenca en distintos momentos y bajo diversas condiciones climáticas. Esta información es clave para una gestión sostenible de los recursos hídricos y la toma de decisiones en la administración del agua, (SENAMHI, 2022).

Figura. 13: Esquema de desarrollo de un SIG



Fuente: (SENAMHI, 2022)

2.2.8.3. Metodología

El desarrollo metodológico y conceptual del Balance Hídrico se presenta a continuación, como una guía técnica para su aplicación y determinación final.

2.2.9. Balance Hídrico Superficial

Para la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca, es necesario determinar el estado actual de la oferta y disponibilidad de agua, así como la presión de la demanda, considerando su distribución espacial y temporal. Esto permite establecer directrices para su protección y sirve de base para los usuarios y planificadores, a fin de considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros.(SENAMHI, 2022)

La ecuación de Balance Hidrológico es una expresión simple, aunque la cuantificación de sus términos suele ser complicada debido a la falta de mediciones directas y la variabilidad espacial de la evapotranspiración, las pérdidas profundas en los acuíferos y las variaciones en el almacenamiento de agua en la cuenca (SENAMHI, 2022)

- En términos generales, podemos afirmar que:
- El agua que cae en un lugar determinado (precipitación = PP).
- Parte de esta regresa a la atmósfera por evaporación directa o por la transpiración de la vegetación (evapotranspiración = ET).
- Otra parte fluye sobre la superficie de la cuenca (escorrentía superficial = Esc).
- Este escurrimiento sigue la red de drenaje hasta llegar a los cauces principales y, eventualmente, al mar. El resto del agua se infiltra en el terreno, incorporándose al sistema de aguas subterráneas o acuífero (infiltración = I). (SENAMHI, 2022)

Estas magnitudes deben cumplir con la siguiente ecuación, conocida como el Balance Hidrológico (Figura 14):

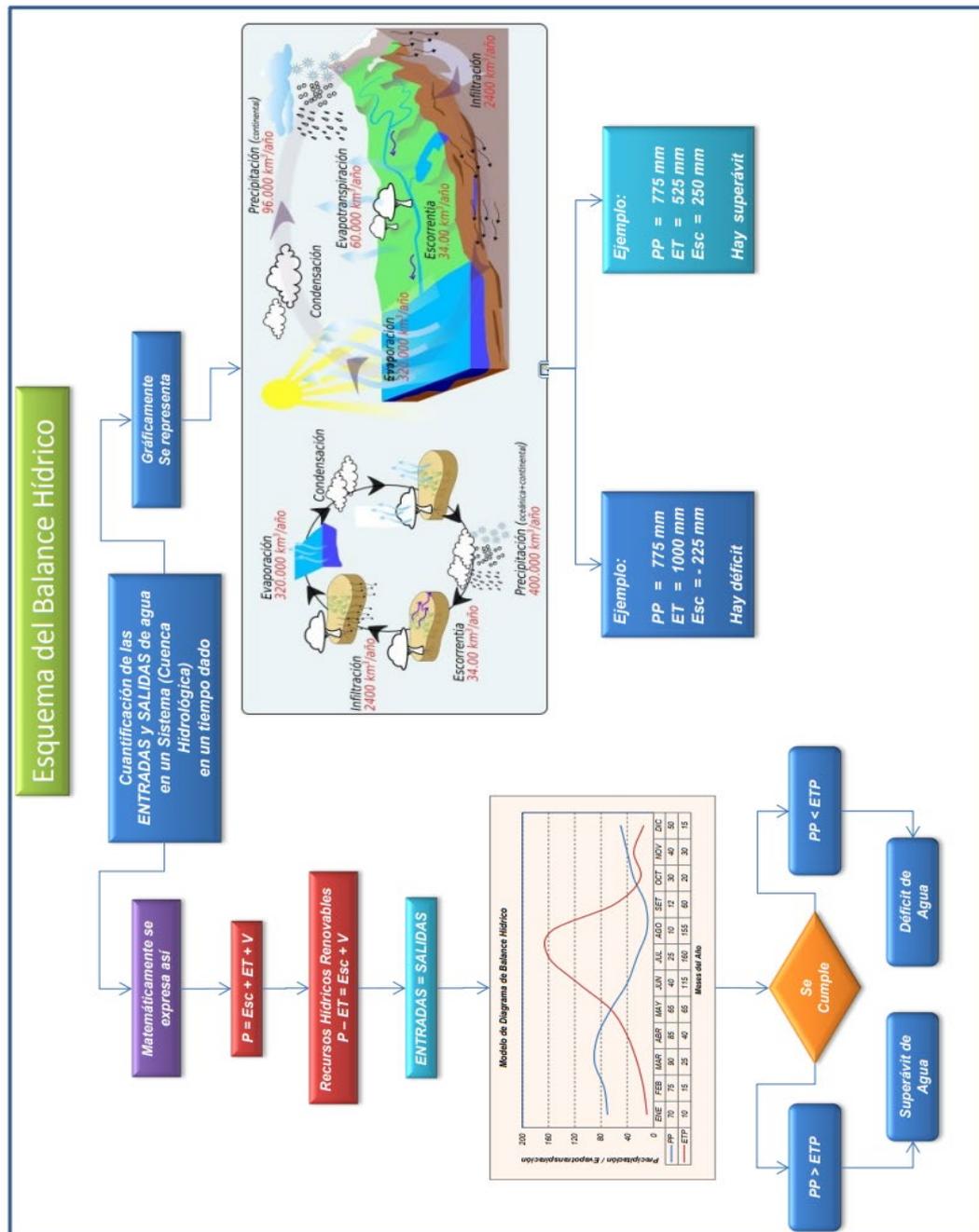
$$P = ETR + ES + I \quad (10)$$

La fórmula general utilizada en el Balance Hidrológico es la siguiente:

$$\text{Captación} - \text{Evapotranspiración} = \text{Escorrentía Superficial} + \text{Infiltración} \quad (11)$$

A través del Balance Hidrológico, podemos conocer el estado de humedad de la cuenca, relacionado con la precipitación recibida y las pérdidas generadas. Esto permite clasificar el tipo de año (húmedo, normal o seco), facilitando la planificación del recurso hídrico según las demandas.

Figura. 14: Esquema de balance Hídrico.



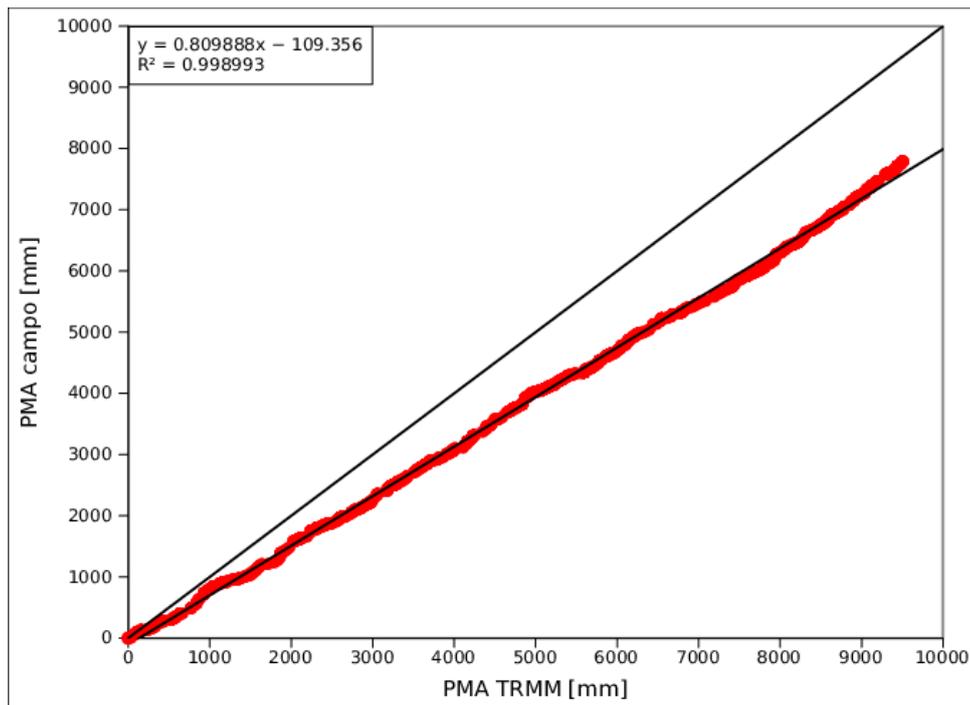
Fuente: (SENAMHI, 2022)

A continuación, se describe el concepto y la metodología utilizada para calcular cada uno de los componentes de la fórmula del balance hídrico.

Precipitación (P): El componente precipitación (P) es fundamental en el balance hídrico, ya que representa la principal fuente de agua en el ciclo hidrológico de una cuenca. La precipitación puede adoptar varias formas, como lluvia, neblina, nieve o rocío, y su cantidad y distribución espacial y temporal pueden variar dentro de una cuenca o subcuenca. A continuación, se detalla cómo se calcula y utiliza este componente:

- **Medición de la precipitación:** La precipitación se mide en estaciones climáticas mediante pluviómetros, que registran la cantidad de agua que cae en una ubicación específica. La periodicidad y fiabilidad de estas estaciones dependen del método de medición y del tiempo de operación (SENAMHI, 2022).
- **Generación de mapas de isoyetas:** Se generan mapas de isoyetas para mostrar la distribución espacial de la precipitación promedio anual en la cuenca. Las isoyetas son líneas que conectan puntos con igual cantidad de precipitación. Estos mapas permiten visualizar cómo varía la precipitación en diferentes partes de la cuenca.
- **Cálculo de la precipitación media areal:** A partir de la información de los mapas de isoyetas, se calcula la precipitación media areal de la cuenca, lo cual es esencial para determinar otros parámetros en el balance hídrico (SENAMHI, 2022).
- **Consideración de la precipitación horizontal:** En algunas áreas, como zonas con alta cobertura boscosa y frecuente niebla, es necesario considerar la precipitación horizontal, que consiste en el agua en forma de neblina que se condensa al contacto con la vegetación. Este tipo de precipitación no se mide directamente en estaciones climáticas convencionales, por lo que requiere mediciones de campo o estimaciones basadas en modelos. (SENAMHI, 2022)

Figura. 15: Análisis de consistencia (Doble masa)



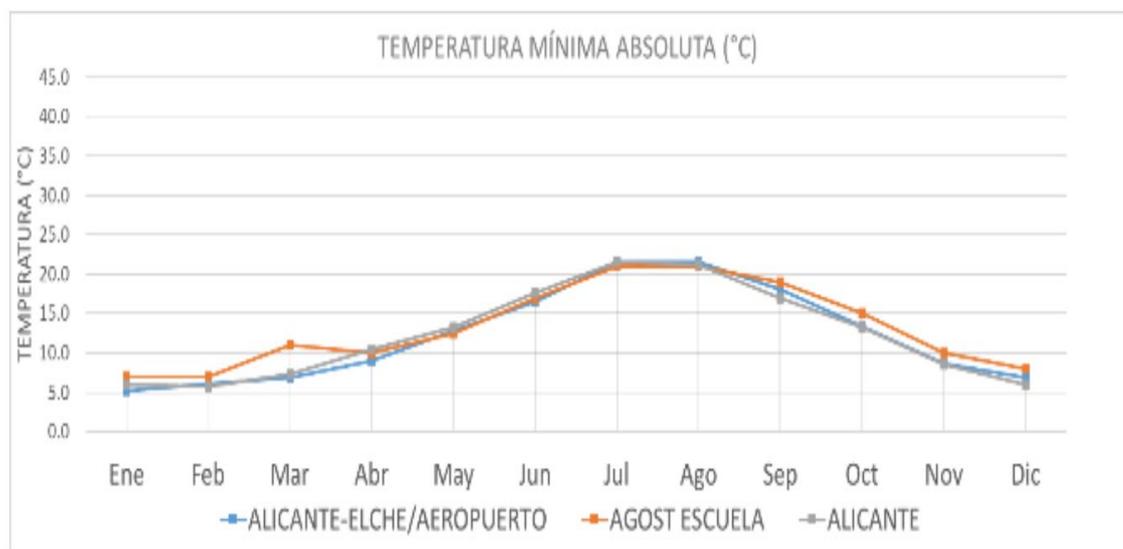
Fuente: (Edward Andy Marín Melo, 2020)

Temperatura (T): es una variable clave en el balance hídrico y juega un rol fundamental en la mayoría de los métodos aplicados en este contexto. Junto con la precipitación, la temperatura es una de las variables más confiables registradas en las estaciones meteorológicas. A continuación, se destacan los puntos clave sobre la temperatura en el balance hídrico:

- La temperatura es una variable climatológica relevante que influye en varios procesos hidrológicos (SENAMHI, 2022).
- Los datos de temperatura se recopilan en estaciones meteorológicas, generalmente en términos de temperatura media diaria, máxima y mínima (SENAMHI, 2022).
- Es necesario realizar un análisis de homogeneización y caracterización de los datos de temperatura para asegurar su consistencia y calidad, lo que implica identificar y corregir posibles irregularidades en los registros.

- Aunque la temperatura no suele mostrar grandes variaciones a lo largo del tiempo, es importante realizar un análisis para uniformizar los datos de temperatura de todas las estaciones climáticas disponibles.
- La uniformización de los datos de temperatura implica extender los registros a diferentes niveles, como promedios, máximas y mínimas, ofreciendo así una representación más completa de la variabilidad térmica en el área de estudio. (SENAMHI, 2022)

Figura. 16: Análisis térmico



Fuente: (Edward Andy Marín Melo Pág, 2020)

Evapotranspiración (T): La evapotranspiración es la cantidad de agua que regresa a la atmósfera a través de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Su magnitud está determinada por la disponibilidad de agua en el suelo y la cantidad de precipitación interceptada por la vegetación. Los valores de intercepción de la precipitación pueden variar según el tipo de vegetación, con un rango generalmente entre el 15% y el 40% de la precipitación total.

Calcular la intercepción de la precipitación y, por lo tanto, la evapotranspiración, puede ser complicado debido a la falta de estaciones de medición

en campo. Por este motivo, es habitual estimar la evapotranspiración potencial (ETP) utilizando fórmulas empíricas. Aunque es un componente clave del balance hídrico, no existe una metodología universal para medir la evapotranspiración a escala de cuenca, por lo que se emplean modelos para estimarla.

La modelación de la evapotranspiración es compleja, ya que requiere representar de manera simple los procesos que la afectan. A continuación, se resumen los métodos utilizados para estimar los distintos aspectos de la evapotranspiración:

Evapotranspiración Potencial (ETP): Estima la cantidad máxima de agua que podría evaporarse y transpirarse si no hubiera limitaciones de agua en el suelo o la vegetación..

Evapotranspiración de Referencia (ETo): Indica la cantidad de agua que podría evaporarse y transpirarse en condiciones ideales de un cultivo de referencia (como césped), utilizada como base para estimar la evapotranspiración de cultivos.

Evapotranspiración Real (ETR): Refleja la cantidad real de agua que se evapora y transpira en un área específica, considerando las condiciones reales del suelo y la vegetación.

Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ETc): Es la cantidad de agua que se evapora y transpira de un cultivo específico, calculada a partir de la ETo y los factores del cultivo, teniendo en cuenta las características de la planta y las condiciones locales. (SENAMHI, 2022).

Coefficiente de Cultivo Kc:

El coeficiente de cultivo (Kc) es un factor utilizado en la agricultura para estimar las necesidades hídricas de los cultivos. Se aplica en la ecuación de la evapotranspiración de referencia (ETo) para determinar la cantidad de agua que necesita un cultivo específico en comparación con la evapotranspiración de referencia,

que mide la pérdida de agua por evaporación y transpiración en una superficie de césped bien irrigada.

La ecuación básica para calcular la evapotranspiración de un cultivo (ET_c) es:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (12)$$

Donde:

ET_c es la evapotranspiración del cultivo.

K_c es el coeficiente de cultivo.

ET₀ es la evapotranspiración de referencia.

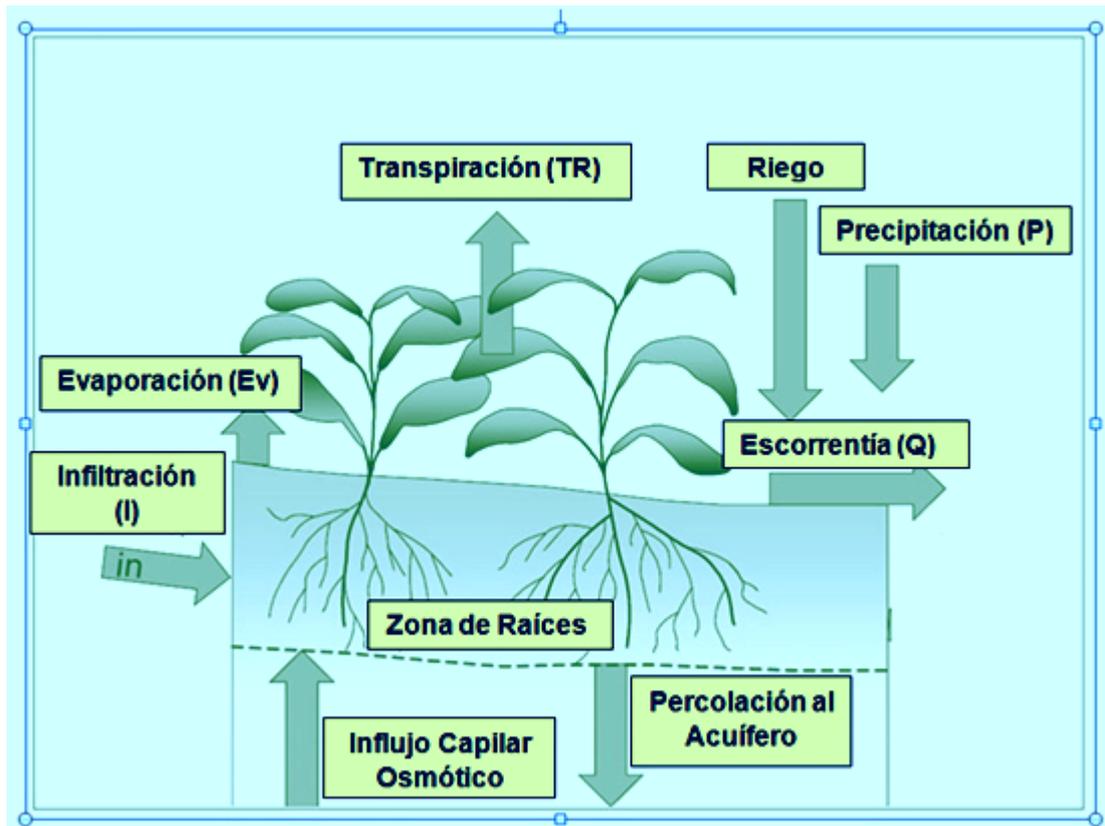
Este coeficiente K_c lo obtenemos de las siguientes tablas:

Tabla 6: Coeficiente de cultivos K_c.

Cultivo	Valor mínimo	Valor máximo
Alfalfa	0.85	1.00
Almendro	0.95	1.05
Arándano	0.60	1.00
Arroz	1.05	1.15
Avellano Europeo	0.70	0.80
Cerezo	1.00	1.25
Ciruelo	0.90	1.15
Damasco	0.80	1.15
Duraznero y Nectarino	1.00	1.15
Espárragos	1.00	1.10
Frambuesa	0.70	0.80
Granado	0.80	0.95
Kiwi	1.10	1.20
Limonero	0.60	0.80
Maíz	1.00	1.10
Manzano	1.05	1.25
Naranja	0.65	0.90
Nogal	0.90	1.10
Olivo	0.55	0.85
Palto	0.75	0.85
Papas	1.00	1.10
Peral	1.00	1.15
Pistacho	1.10	1.30
Pradera	0.90	1.05
Remolacha	1.00	1.10
Tabaco	0.95	1.10
Tomate	1.00	1.10
Vides Viníferas	0.50	0.60
Vid de mesa	0.80	1.30

Fuente: (Edward Andy Marín Melo Pág, 2020)

Figura. 17: Componentes de la evapotranspiración



Fuente: (Edward Andy Marín Melo Pág, 2020)

Infiltración (T): La infiltración es el proceso por el cual el agua de las precipitaciones penetra en la superficie del suelo y llena los poros del suelo y el subsuelo. Varios factores afectan la capacidad de infiltración, tales como la entrada superficial, la transmisión a través del suelo, la capacidad de almacenamiento, las características del medio permeable y las propiedades del agua (SENAMHI, 2022).

Para calcular la cantidad de precipitación que se infiltra mensualmente en el suelo (P_i), se utiliza la siguiente fórmula. (SENAMHI, 2022).

$$P_i = P - Ret \quad (13)$$

Donde:

P_i es la precipitación que se infiltra mensualmente, medida en milímetros por mes (mm/mes).

P es la precipitación mensual en milímetros por mes (mm/mes).

Ret es la retención mensual de lluvia por el follaje, en milímetros por mes (mm/mes).

En el contexto del Balance Hídrico, generalmente se asume que la variabilidad de la retención de lluvia es mínima y puede considerarse cero, especialmente en análisis anuales. Por lo tanto, la fórmula se simplifica a:

$$P_i = P \quad (14)$$

Esta fórmula calcula la cantidad de precipitación que realmente penetra en el suelo y está disponible para procesos como la recarga de acuíferos y la alimentación de corrientes de agua subterránea. (SENAMHI, 2022).

Escorrentía superficial o caudal

Caudal: El caudal es clave para el aprovechamiento del recurso hídrico, pues es necesario conocer el caudal disponible en un punto determinado o en la salida de la cuenca a partir de las precipitaciones. Aunque el problema parece simple, su solución es compleja, y para ello se han ideado diversas metodologías que van desde isolíneas de escorrentía hasta modelos de simulación precipitación-escorrentía. (SENAMHI, 2022).

Para cuencas con características fisiográficas y comportamiento hidrológico similar, el caudal específico se puede estimar con la fórmula:

$$Q_x = \frac{(A_x \cdot P_x) \cdot Q}{A \cdot P} \quad (15)$$

donde:

Q_x = Caudal a estimar en la cuenca X en m^3/s

A_x = Área de la cuenca X en Km^2

Q_A = Caudal registrado en la cuenca A en m^3/s

A_A = Área de la cuenca A en m^2

Para subcuencas, se ha considerado una ecuación que también relaciona el aporte pluviométrico. (SENAMHI, 2022).

$$Q_x = \frac{(A_x) \cdot Q_A}{A_A} \quad (16)$$

donde:

Q_x = Caudal a estimar subcuenca en m³/s

A_x = Área de la subcuenca en Km²

P_x = Precipitación espacial sobre la subcuenca en mm

Q = Caudal del río en m³ /s.

A = Área de la cuenca del río

P = Precipitación espacial sobre la cuenca del río

Escorrentía: El agua de las precipitaciones que no se evapora ni infiltra escurre de dos maneras:

- Escorrentía directa: Agua que llega a los cauces en poco tiempo tras la precipitación, incluyendo la superficial y subsuperficial.
- Escorrentía basal: Agua que sostiene los cauces durante el estiaje (SENAMHI, 2022a).

Tras estimar los volúmenes infiltrados, el agua restante se considera escurrimiento superficial. Para calcular la escorrentía anual (mm), se usa la fórmula: (SENAMHI, 2022a).

Su fórmula es:

$$E = \frac{31,536 \cdot Q}{A} \quad (17)$$

donde:

E = Escorrentía en mm

Q = Caudal en m³ /s

$A = \text{Área de drenaje km}^2$

$$Esc = PP \times ETc \quad (18)$$

En áreas con control hidrométrico, se usa:

Donde:

$$P = E \times ETR \quad (19)$$

P = Precipitación media del período y área en mm.

E = Escorrentía del período y área en mm.

ETR = Evapotranspiración real media del período y área en mm.

En áreas sin control hidrométrico, el Balance hídrico es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$E = P \times ETR \quad (20)$$

(SENAMHI, 2022)

2.2.10. Producto Grillado PISCO.

Según (SENAMHI, 2022b), la precipitación es fundamental en el ciclo hidrológico y su correcta estimación es clave para diversos procesos vinculados a los recursos hídricos. Si bien los pluviómetros proporcionan datos precisos, presentan limitaciones en cuanto a cobertura espacial. Los datos satelitales son una alternativa útil para abordar este problema. En Perú, el SENAMHI ha investigado y validado productos satelitales con el fin de mejorar la representación espacial de las precipitaciones en el país, lo que ha llevado a la creación de la base de datos espacial de precipitación PISCOp.

PISCOp es una base de datos que ofrece información sobre la precipitación en Perú con una resolución espacial de 0.05° y datos desde enero de 1981. Utiliza la base global CHIRPS como referencia para su generación y ha evolucionado para incluir datos de precipitación diaria. PISCOp se emplea en la calibración de modelos

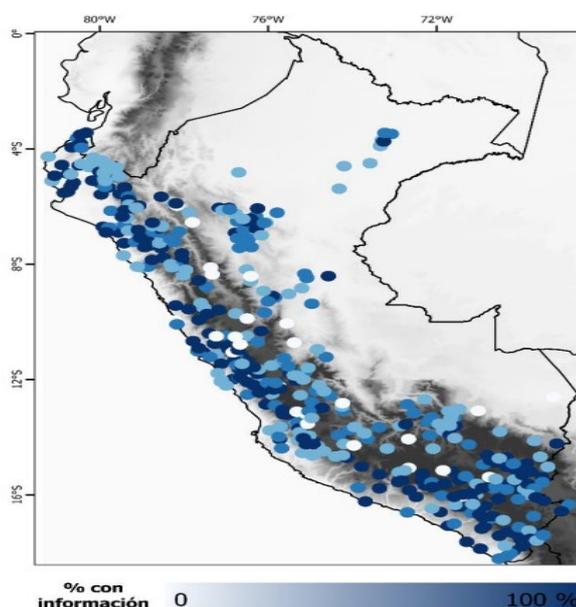
hidrológicos, pronóstico de caudales y monitoreo de inundaciones y sequías, entre otros. Esta Nota Técnica establece pautas metodológicas para su uso adecuado, resaltando ventajas y limitaciones en cuanto a la validez de los datos en diferentes regiones del Perú. Además, se prevé ampliar PISCOp para incluir datos de temperatura, evapotranspiración y caudales en el futuro.

La metodología de creación de PISCO (Datos interpolados peruanos de observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI) se divide en tres etapas principales:

- **Control de calidad de la información pluviométrica:** Este proceso fue realizado en 681 estaciones meteorológicas administradas por SENAMHI e incluyó una revisión automática para eliminar valores duplicados y atípicos, seguido de una revisión visual de las series temporales. Al final, se seleccionaron 443 estaciones para la generación de PISCO.
- **Análisis exploratorio (AE) de datos satelitales:** Se utilizó información satelital para complementar los datos de pluviómetros, mediante un análisis exploratorio de la información de los satélites.
- **Combinación de datos mediante técnicas geoestadísticas (mensuales) y determinísticas (diarias):** Para generar PISCOp mensual y diario, se emplearon técnicas geoestadísticas y determinísticas que combinaron los datos de las estaciones meteorológicas con la información satelital para obtener estimaciones más precisas de la precipitación.

El proceso de control de calidad y selección de estaciones siguió criterios rigurosos para garantizar la fiabilidad de los datos utilizados en la creación de PISCO. (SENAMHI, 2022).

Figura. 18: Red de estaciones utilizadas para PISCOp



Fuente: (SENAMHI, 2022)

A escala nacional, para la elaboración de PISCOp considerando porcentajes de datos por estación en el período 1981-2016, el análisis exploratorio del producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), tanto mensual como diario, revela lo siguiente:

Características de CHIRPS: CHIRPS es una base de datos de precipitación disponible desde 2014, gestionada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la Universidad de California, Santa Bárbara (UCSB). Contiene datos desde 1981, cubriendo áreas entre las latitudes 50° S y 50° N, con una resolución espacial de 0.05° (SENAMHI, 2022).

CHIRPS ofrece datos en varias resoluciones temporales: diaria, pentadiaria, decadiaria, mensual y anual.

CHIRPS se genera utilizando múltiples fuentes de datos, como CHPCLim (Climatología de Precipitación de Peligros Climáticos), datos infrarrojos térmicos geoestacionarios, la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) de la NASA, el modelo atmosférico CFSv2 de la NOAA, y observaciones in situ de precipitaciones.

Modificación de CHIRP a CHIRPM (CHIRP Modificado): CHIRPM es una versión modificada de CHIRP para mejorar la representación de la precipitación en Perú. Esta modificación se aplica tanto a nivel diario (CHIRPMd) como mensual (CHIRPMm). La ecuación utilizada se basa en parámetros de regresión lineal como el "Cold Cloud Duration Percent" (CCD) y las climatologías del TRMM2A25, además de un factor adicional (E) para evitar desviaciones significativas.

El objetivo de la modificación de CHIRP a CHIRPM es mejorar la precisión de los datos de precipitación en Perú para la generación de PISCO. Las ecuaciones utilizadas son: (SENAMHI, 2022).

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas en la modificación de CHIRP a CHIRPM:

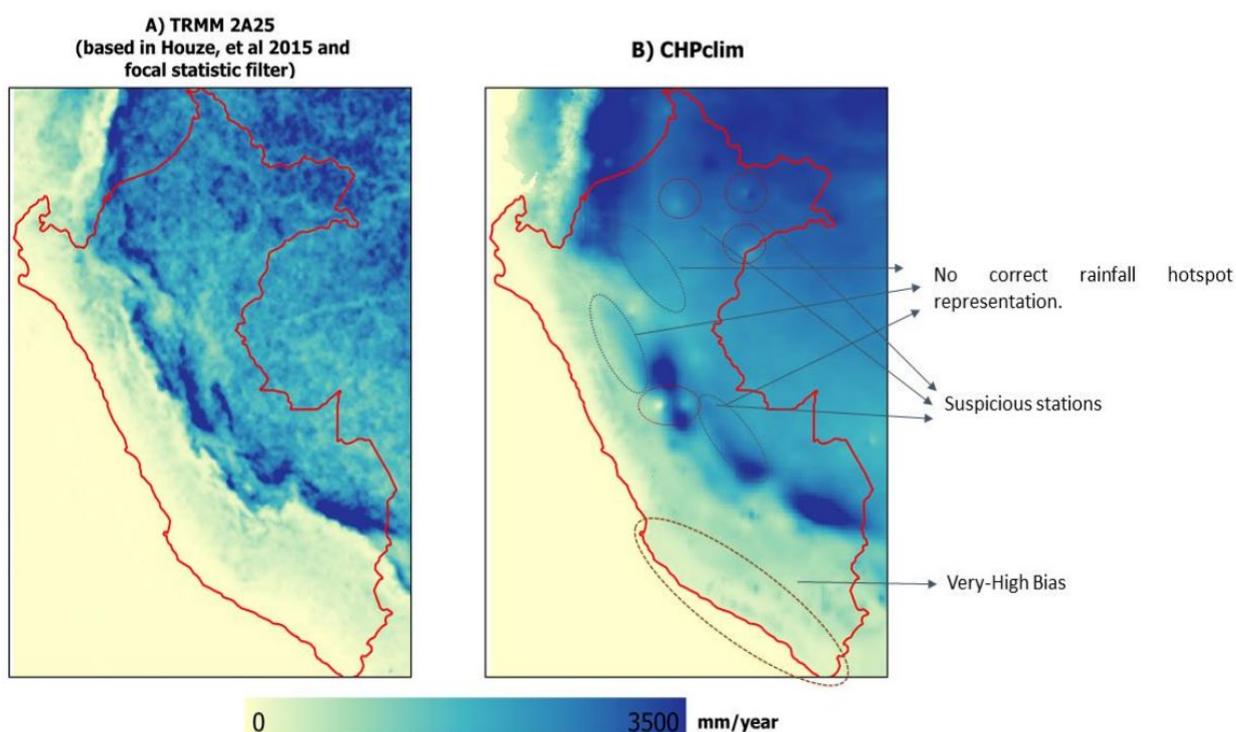
CHIRPM mensual:

$$\text{CHIRPM} = (b_0 + b_1 \cdot \text{CCD}) \cdot \text{CHP}_{\text{clim}} \cdot \frac{\text{TRMM2A25} + E}{\text{CHP}_{\text{clim}} + E} \quad (21)$$

Para CHIRPM (CHIRP Modificado) a nivel diario:

CHIRPM diario: La metodología diaria implica modificar la técnica de interpolación "inverso de la distancia ponderada" y aplicar una corrección de sesgo basada en valores mensuales. Aunque no se proporciona la ecuación detallada, se optimizan los parámetros de interpolación y se caracteriza la estructura espacial para mezclar los datos. (SENAMHI, 2022).

Figura. 19: Climatología de precipitación (1998-2014)



Fuente: (SENAMHI, 2022), A la izquierda, se presenta la climatología de precipitación (1998-2014) generada con datos del TRMM2A25, y a la derecha, la climatología basada en CHPclim.

Es importante destacar los valores excesivos observados en la costa sur del país. La generación de PISCO implica la combinación de datos pluviométricos con CHIRPM (una versión modificada de CHIRP basada en las climatologías del TRMM2A25), tanto a nivel mensual como diario. A continuación, se detalla la metodología utilizada y los resultados de la validación del producto PISCOp:

Mezcla de la información pluviométrica y CHIRPM: Para la combinación mensual, se emplea la técnica geoestadística Kriging con Deriva Externa (KED), considerada robusta. La precipitación observada es la variable que se regionaliza, mientras que la precipitación estimada por CHIRPM es la covariable.

A nivel diario, se utiliza una modificación de la técnica de interpolación "inverso de la distancia ponderada" junto con una corrección de sesgo basada en

valores mensuales. Los parámetros de interpolación se optimizan, y la estructura espacial se define para cada mes y día desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016. (SENAMHI, 2022b).

Validación del producto PISCOp:

Según, (SENAMHI, 2022). e realizó una validación independiente comparando los productos CHIRP, PISCOp, y mediciones de pluviómetros ubicados a más de 10 km que no fueron usados en la interpolación debido a su corto registro (menos de 10 años).

A nivel diario, los resultados fueron mejores que a nivel mensual, particularmente en las regiones de la costa, sierra y selva. A nivel mensual, el comportamiento sistémico de las precipitaciones es más importante que el comportamiento aleatorio.

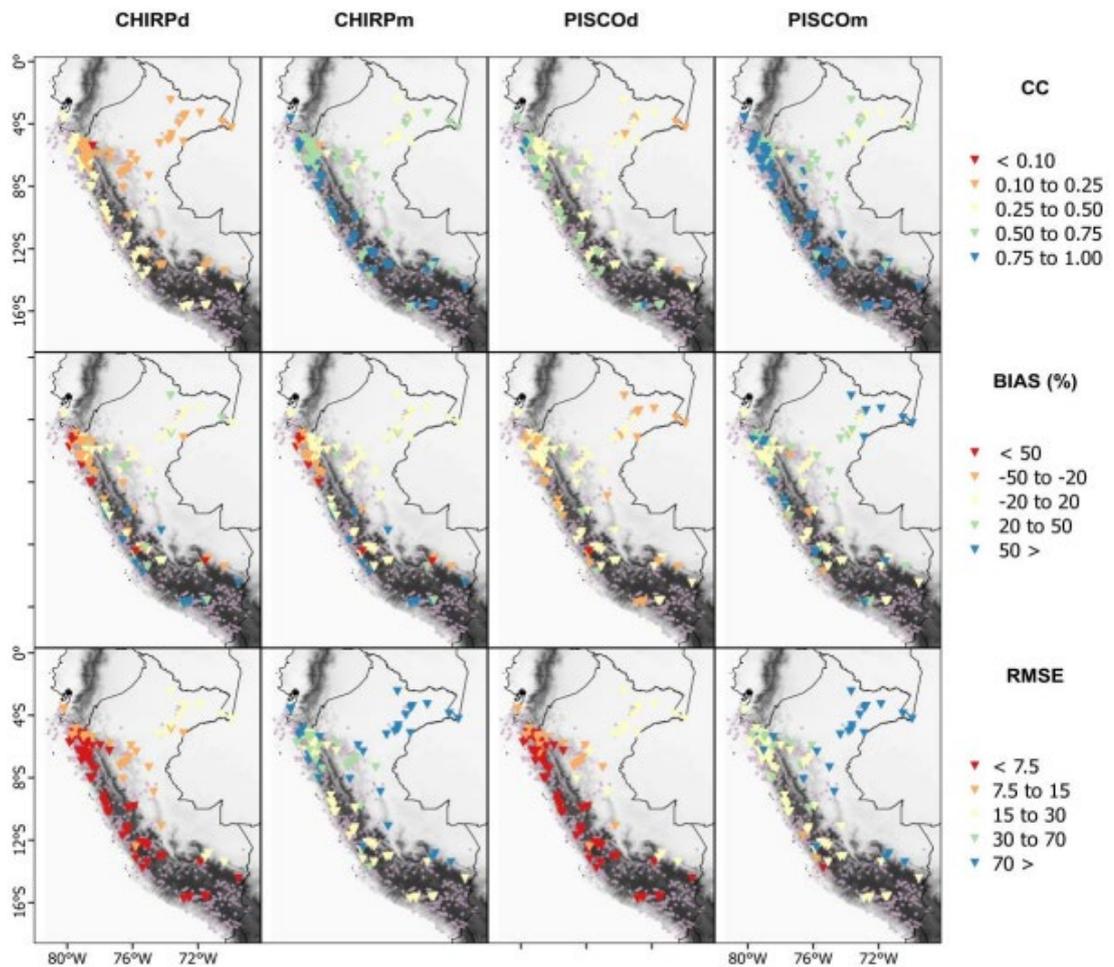
PISCOpm y PISCOpd mostraron una mejora significativa en el coeficiente de correlación (CC) en comparación con CHIRPd y CHIRPm, especialmente en la costa y la sierra. No obstante, en la selva, donde la densidad de estaciones es baja, es más difícil caracterizar la estructura espacial, lo que limita el rendimiento de PISCOp en esa zona. (SENAMHI, 2022).

Además del CC, se evaluaron otros estadísticos como el BIAS % y el RMSE para medir las intensidades de las precipitaciones. Estos reflejan un mejor rendimiento en la sierra y la selva, aunque se observaron sobreestimaciones importantes en la costa. Sin embargo, debido a que la costa presenta precipitaciones muy bajas (menos de 100 mm anuales), el menor rendimiento en esta región es menos significativo. (SENAMHI, 2022).

En general, PISCOp mejora la representación de las precipitaciones en comparación con CHIRP, especialmente a nivel mensual en la costa y la sierra. El

rendimiento en la selva está limitado por la baja densidad de estaciones, y en la costa, con precipitaciones muy bajas, PISCOp se considera adecuado. Este producto es útil para modelamiento hidrológico y otras aplicaciones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos. (SENAMHI, 2022).

Figura. 20: Coeficiente de Correlación (CC),



Fuente: (SENAMHI, 2022) El **BIAS en porcentaje** y el **RMSE** obtenidos durante la validación independiente se presentan en los resultados. Los **puntos rosados** en el gráfico indican las estaciones que se utilizaron para generar PISCOp.

2.2.11. Índice SPI Y SPEI

Este método fue desarrollado por el Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (SISSA), que proporciona herramientas e información sobre las sequías y sus impactos a gobiernos, ONGs, instituciones privadas y personas particulares.

Los índices SPI (Índice Estandarizado de Sequía) y SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) son metodologías utilizadas para medir y cuantificar la sequía. Ambos índices son herramientas importantes en el campo de la climatología y la gestión de los recursos hídricos.(SISSA, 2021).

El SPI se basa solo en datos de precipitación y mide la anomalía de la precipitación acumulada a lo largo de diferentes períodos. Proporciona una medida estandarizada que permite comparar diferentes regiones y épocas. Se calcula transformando la distribución de probabilidad de la precipitación acumulada en una distribución normal.

Por otro lado, el SPEI incluye tanto los datos de precipitación como los de evapotranspiración, convirtiéndose en una medida más completa de la sequía, ya que tiene en cuenta la demanda de agua de la vegetación y la atmósfera. El cálculo del SPEI es similar al del SPI, pero incluye tanto la precipitación como la evapotranspiración, lo que permite evaluar la sequía en función de la disponibilidad real de agua y la demanda atmosférica en una región. (SISSA, 2021).

Deciles de Precipitación.

Las sequías pueden caracterizarse mediante deciles de precipitación, que dividen la distribución acumulada de lluvias para un período en 10 categorías con probabilidades de ocurrencia aproximadamente iguales. Los deciles fueron utilizados por primera vez en Australia por Gibbs y Maher (1967) para el estudio de las sequías. Para calcular los deciles, primero se determinan los totales de lluvia para cada mes o año, se ordenan de menor a

mayor, y se calculan los percentiles (p10, p20, etc.) que separan las lluvias en 10 categorías. Finalmente, cada valor de precipitación se asigna a su decil correspondiente. (SISSA, 2021).

Dado que algunas estaciones tienen registros cortos o datos faltantes, los percentiles se calculan solo si hay al menos 20 valores dentro de los 40 posibles. Los percentiles se pueden estimar dividiendo la serie en partes iguales o utilizando el método "bootstrap", que genera múltiples series a partir de la original para calcular una estimación promedio. Este procedimiento corrige los sesgos que puedan surgir. (SISSA, 2021).

Varios autores han utilizado los deciles para estudiar las sequías y compararlos con otros índices. Keyantash y Dracup (2002) consideran los deciles como uno de los índices más apropiados para monitorear distintos tipos de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola). La principal ventaja de este índice es su simplicidad en el cálculo y la ausencia de presunciones sobre distribuciones teóricas para la precipitación. Varios autores han utilizado los deciles para estudiar las sequías y compararlos con otros índices. Keyantash y Dracup (2002) consideran los deciles como uno de los índices más apropiados para monitorear distintos tipos de sequía (meteorológica, hidrológica y agrícola). La principal ventaja de este índice es su simplicidad en el cálculo y la ausencia de presunciones sobre distribuciones teóricas para la precipitación.

Escalas del Índice de Sequía.

La siguiente tabla muestra las categorías de los distintos índices de sequía utilizados por el CRC-SAS. Para cada índice, se especifican los rangos de valores y las probabilidades de ocurrencia de las categorías, con excepción del porcentaje de precipitación normal (PPN), para el cual no es fácil definir una probabilidad única de ocurrencia. Las probabilidades son específicas para cada estación, mes y escala. (SISSA, 2021).

Tabla 7: Escalas de Índice de sequía.

Categoría	SPI/SPEI	Decil	Categorías INMET	PPN
Sequía extrema	$SPI/SPEI \leq -1.5$; prob: 0.067	$PP \leq p_{10}$; prob: 0.10	$PP \leq p_5$; prob: 0.05	$0\% \leq PPN < 25\%$
Sequía severa	$-1.5 < SPI/SPEI \leq -1.0$; prob: 0.092	$p_{10} < PP \leq p_{20}$; prob: 0.10	$p_5 < PP \leq p_{15}$; prob: 0.10	$25\% \leq PPN < 50\%$
Sequía moderada	$-1.0 < SPI/SPEI \leq -0.5$; prob: 0.150	$p_{20} < PP \leq p_{30}$; prob: 0.10	$p_{15} < PP \leq p_{33}$; prob: 0.18	$50\% \leq PPN < 75\%$
Normal	$-0.5 < SPI/SPEI < 0.5$; prob: 0.383	$p_{30} < PP \leq p_{70}$; prob: 0.40	$p_{33} < PP \leq p_{66}$; prob: 0.34	$75\% \leq PPN < 125\%$
Moderadamente húmedo	$0.5 \leq SPI/SPEI < 1.0$; prob: 0.15	$p_{70} < PP \leq p_{80}$; prob: 0.10	$p_{66} < PP \leq p_{85}$; prob: 0.18	$125\% \leq PPN < 150\%$
Severamente húmedo	$1.0 \leq SPI/SPEI < 1.5$; prob: 0.092	$p_{80} < PP \leq p_{90}$; prob: 0.10	$p_{85} < PP \leq p_{95}$; prob: 0.10	$150\% \leq PPN < 250\%$
Extremadamente húmedo	$SPI/SPEI \geq 1.5$; prob: 0.067	$PP > p_{90}$; prob: 0.10	$PP > p_{95}$; prob: 0.05	$PPN \geq 250\%$

Fuente: (SISSA, 2021).

2.2.12. Extensión de datos para períodos futuros

Existen varias formas de realizar la extensión de datos, como las distribuciones probabilísticas y los modelos de regresión. Sin embargo, la mayoría de estos métodos dependen de otras series de datos, lo que representa una limitación importante. No obstante, el modelo autorregresivo Markoviano es una opción que genera series sintéticas a partir de la tendencia de una única serie, logrando una aproximación muy cercana.

El modelo autorregresivo de orden 1, también conocido como AR(1) o modelo Markoviano de orden 1, es un tipo de modelo estadístico utilizado en el análisis de series temporales. Este modelo establece que los valores futuros de una variable dependen linealmente de sus valores pasados, con un retardo de un período.

La ecuación del modelo AR(1) se expresa de la siguiente manera:

$$X_t = \phi \cdot X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (22)$$

X_t es el valor de la serie temporal en el tiempo

ϕ es el parámetro de auto regresión, que representa la dependencia lineal entre

X_{t-1} Si ϕ es positivo, indica una relación positiva; si es negativo, indica una relación negativa.

X_{t-1} es el valor de la serie temporal en el tiempo $t-1$, es decir, el valor inmediatamente anterior.

ε_t es un término de error en el tiempo t , que captura la variabilidad no explicada por la relación autorregresiva. Se asume que este término sigue un proceso estocástico, normalmente distribuido con media cero y desviación estándar constante.

La interpretación de ϕ es esencial en el modelo **AR(1)**. Si ϕ está cerca de 1, implica una fuerte dependencia entre X_t y X_{t-1} , lo que sugiere una serie temporal persistente. Por otro lado, si ϕ está cerca de 0, la dependencia entre los valores consecutivos es más débil.

La estimación de los parámetros, incluido ϕ , se realiza generalmente mediante **máxima verosimilitud** o **mínimos cuadrados**. Además, el análisis de la **autocorrelación** y la **función de autocorrelación parcial** ayuda a determinar si un modelo AR(1) es apropiado para describir la serie temporal en cuestión.

2.2.13. Crecimiento de cultivos a lo largo de las distintas estaciones del año:

Tabla 8: Cultivos en las distintas estaciones del año

Vegetal/Fruto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tomate				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Zanahoria	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lechuga			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Espinaca	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Brócoli				✓	✓	✓	✓	✓				
Calabacín				✓	✓	✓	✓	✓				
Maíz					✓	✓	✓	✓				
Fresas			✓	✓	✓	✓	✓					
Manzana						✓	✓	✓	✓	✓		
Naranja	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓
Plátano	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Robles (Bellotas)									✓	✓	✓	
Granos (Trigo, Maíz, etc.)					✓	✓	✓	✓				
Pastos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Matorrales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinos (Piñas)									✓	✓	✓	

Este cuadro muestra que ciertos productos, como la papa, la zanahoria, la espinaca, el plátano, los pastos y los matorrales, están disponibles durante todo el año, lo que evidencia su capacidad de adaptarse a distintas condiciones climáticas y su importancia en la dieta diaria. Por otro lado, productos como el tomate, el brócoli, el calabacín, el maíz y las fresas tienen una disponibilidad más estacional, concentrándose en los meses más cálidos. La manzana y la naranja muestran picos de disponibilidad en diferentes épocas del año, reflejando sus ciclos naturales de cosecha. Los robles y los pinos producen frutos hacia finales de año, mientras que los granos tienen su cosecha a mediados del año.

2.3. Definición de Términos Básicos

2.3.1. Topografía:

La topografía estudia los métodos utilizados para determinar la posición de un punto en la superficie terrestre, mediante mediciones que se basan en los tres elementos del espacio: dos distancias y una elevación, o bien una distancia, una elevación y una dirección (Bateman, 2017)

2.3.2. Hidrología:

La hidrología es la ciencia que estudia el agua, su aparición, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus características químicas y físicas, y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Aparicio Mijares, 2018)

2.3.3. Balance Hídrico:

El balance hídrico es una técnica que compara las entradas y salidas de agua en una región o sistema, y que permite evaluar la disponibilidad y manejo del agua en ese lugar. (SENAMHI, 2022a)

2.3.4. Modelo SWAT:

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta de modelación hidrológica que se utiliza para predecir la cantidad de agua y los contaminantes que se desplazan por una cuenca hidrográfica. Es útil para la planificación del uso del suelo y la gestión de los recursos hídrico. (Soil and Water Assessment Tool, 2018)

2.3.5. Producto Grillado PISCO:

PISCO es un producto de datos espaciales que proporciona información sobre la precipitación en grillas de alta resolución, lo que resulta útil para el monitoreo del clima y el análisis de los recursos hídrico. (SENAMHI, 2022b)

2.3.6. Índice de Sequía:

El índice de sequía es una medida que evalúa el nivel de aridez o falta de humedad en una región específica durante un período determinado. Este índice permite determinar la gravedad de una sequía y sus efectos en el medio ambiente y en la agricultura.(SISSA, 2021).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Características Geomorfológicas e Hidrológicas la Cuenca

3.1.1. Modelos de elevación digital.

Los datos cartográficos clave para este estudio provienen del satélite ALOS, una misión dirigida por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). A través de su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar), el satélite captura imágenes globales aproximadamente cada 45 días. Algunas de sus especificaciones clave son:

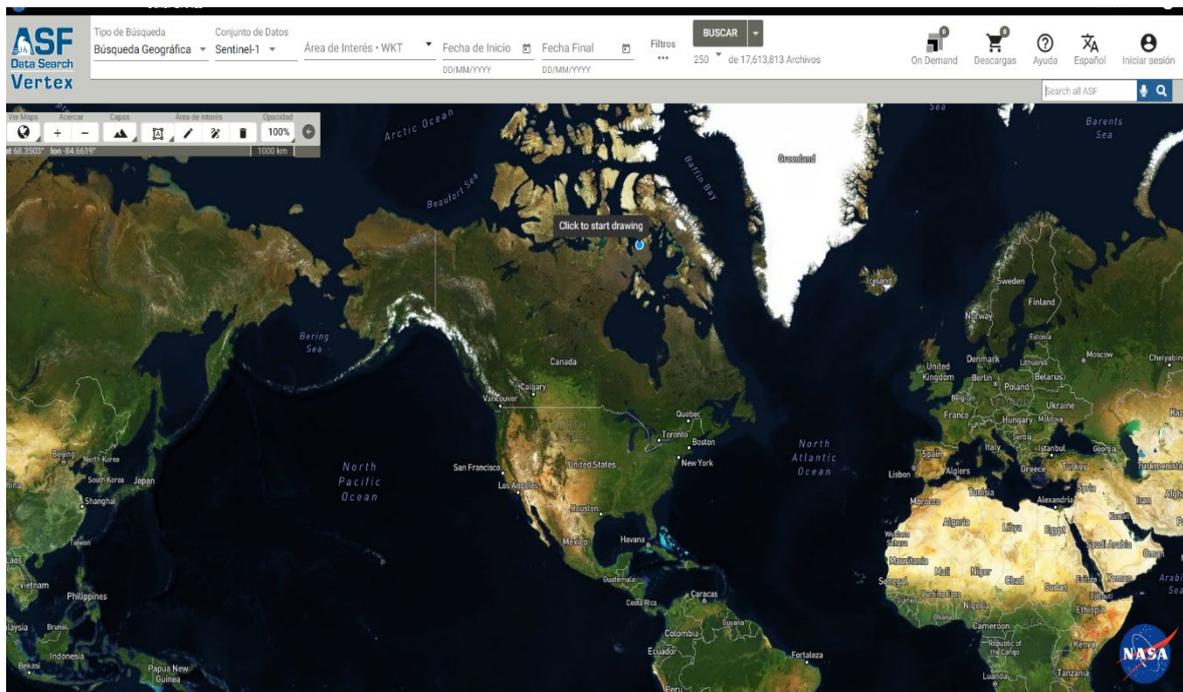
- Operado por: JAXA - Cross Restec.
- Fecha de lanzamiento: enero de 2006.
- Resolución espacial de las imágenes: 6,25 o 12,5 metros.
- Ángulo de incidencia: 8°.
- Polarizaciones disponibles: HH o VV.
- Tamaño de captura de escenas: 50 km x 70 km.

Las imágenes PALSAR están disponibles en tres niveles de procesamiento (1.0 - Imagen Cruda, 1.1 - Datos Comprimidos, o 1.5 - Imagen Expandida) en formato CEOS, con una resolución radiométrica de 16 bits. El Modelo Digital de Elevación (DEM) derivado de estos datos puede descargarse de forma gratuita a través del portal VERTEX, con registro previo en: ASF Data Search (alaska.edu)

Los DEM de precisión de 5 metros son conjuntos de datos geospaciales que representan la elevación del terreno con una resolución espacial de 5 metros. Estas herramientas permiten un análisis detallado de la topografía. Algunas de sus características y aplicaciones son:

- Resolución espacial: Cada píxel representa un área de 5 x 5 metros, capturando detalles topográficos precisos para diversas aplicaciones.
- Precisión vertical: Los DEM de 5 metros ofrecen alta precisión vertical, siendo útiles en ingeniería, planificación urbana y gestión de recursos naturales.
- Fuentes de datos: Los DEM se generan a partir de diversas fuentes como levantamientos terrestres, datos LIDAR, imágenes satelitales y otros sensores remotos, influyendo la calidad de los datos de entrada en la precisión final del DEM.

Figura. 21: Interfaz ASF data search.



Fuente: ASF Data Search

3.2. Mapas de Uso de Suelos de la FAO

La FAO proporciona datos globales sobre la cobertura de suelo, los cuales son fundamentales para múltiples aplicaciones, incluyendo la planificación agrícola, la gestión de recursos naturales, la evaluación de riesgos ambientales y la investigación científica. Estos datos se obtienen mediante imágenes satelitales y técnicas de teledetección,

permitiendo la identificación y clasificación de distintos tipos de cobertura de suelo en la superficie terrestre.

Algunas de las características destacadas de los datos de cobertura de suelo proporcionados por la FAO incluyen:

3.2.1. Cobertura Global:

La FAO proporciona datos de cobertura del suelo a nivel global, lo que facilita su aplicación en diversas regiones y países.

3.2.2. Clasificación de Cobertura:

Estos datos permiten clasificar la cobertura del suelo en categorías como bosques, pastizales, tierras agrícolas, áreas urbanas y cuerpos de agua. Esta información resulta valiosa para comprender la distribución de los distintos tipos de terreno y su uso.

3.2.3. Resolución Espacial:

La resolución espacial de los datos de cobertura de suelo puede variar, y la FAO suele ofrecer datos de diferentes resoluciones para adaptarse a las necesidades específicas de los usuarios.

3.2.4. Actualización Regular:

La FAO actualiza sus datos de cobertura del suelo de forma periódica, utilizando imágenes satelitales recientes y tecnologías avanzadas de teledetección. Esto garantiza que la información sea precisa y actualizada.

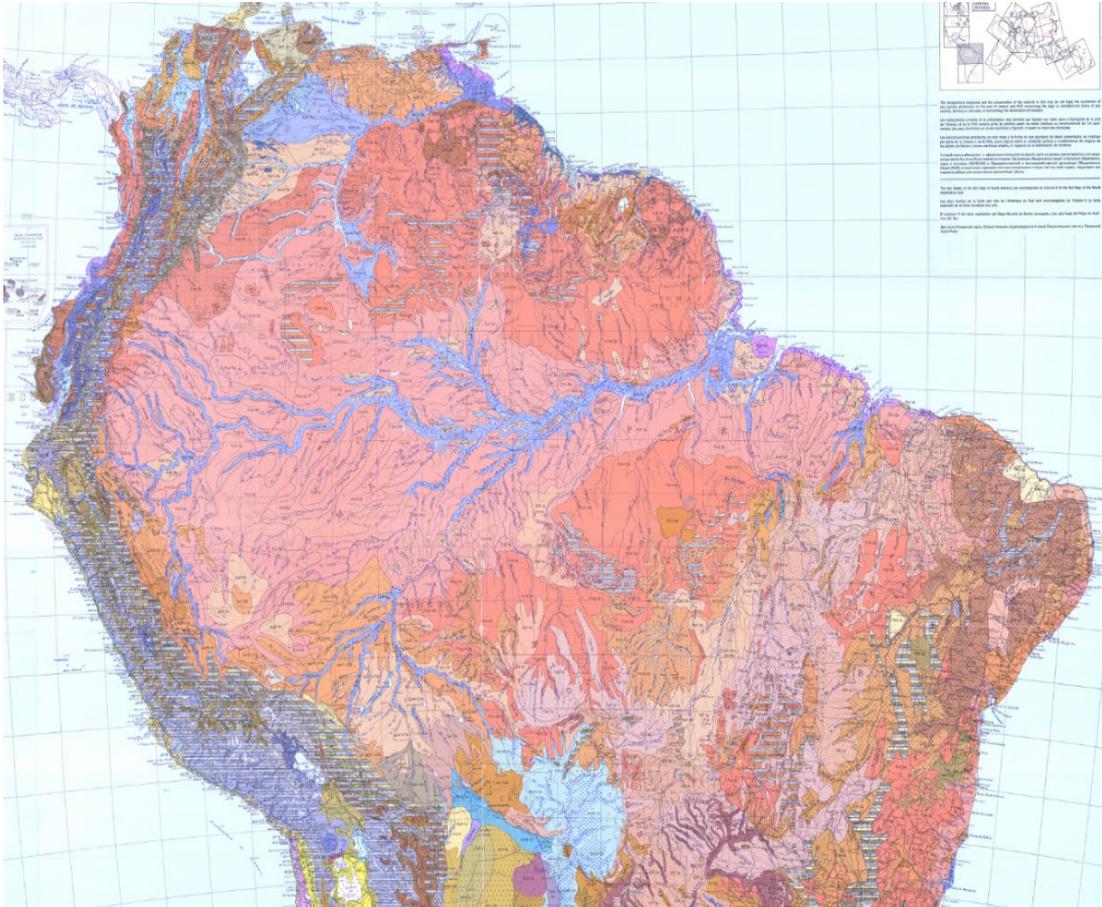
3.2.5. Acceso Público:

En muchos casos, los datos de cobertura del suelo proporcionados por la FAO están disponibles gratuitamente para el público, lo que facilita su uso en diversas aplicaciones.

Estos datos son esenciales para una amplia gama de actividades, desde la planificación agrícola hasta la gestión de recursos naturales y el monitoreo de los cambios ambientales. Ofrecen a investigadores, planificadores y responsables de la toma de

decisiones una visión más detallada y completa de la distribución y el uso del suelo en diferentes regiones del mundo. (UNESCO, 2019)

Figura. 22: Mapa de Uso de suelos de la FAO en Sudamérica.

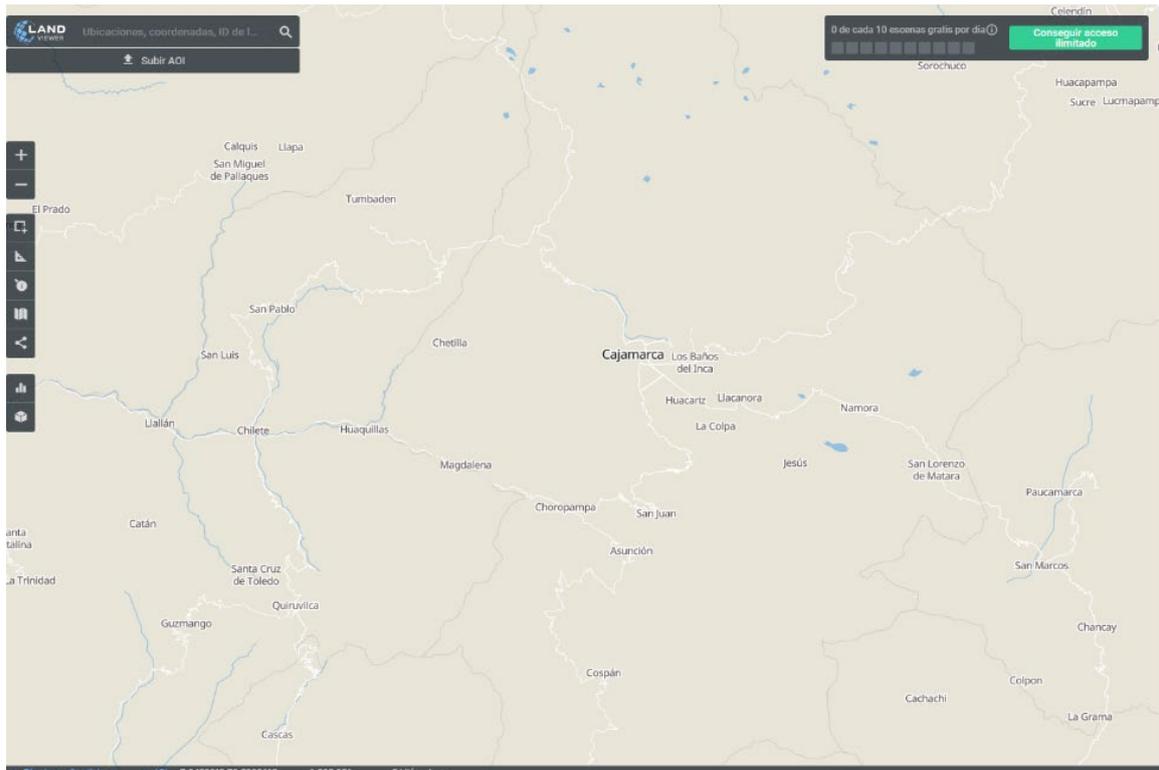


Fuente: FAO

3.3. DEM de cobertura vegetal para el análisis NDVI

Land Viewer, la herramienta en línea más reciente desarrollada por **EOS Inc.** (siglas de **Earth Observing System**), es una potente plataforma que proporciona acceso gratuito a una extensa colección de imágenes de los satélites **Landsat 8** y **Sentinel-2**. Una de las principales ventajas de este sistema es que permite aplicar varios filtros, lo que facilita la búsqueda rápida del producto de interés:

Figura. 23: Datos de cobertura vegetal EosLandviewer.



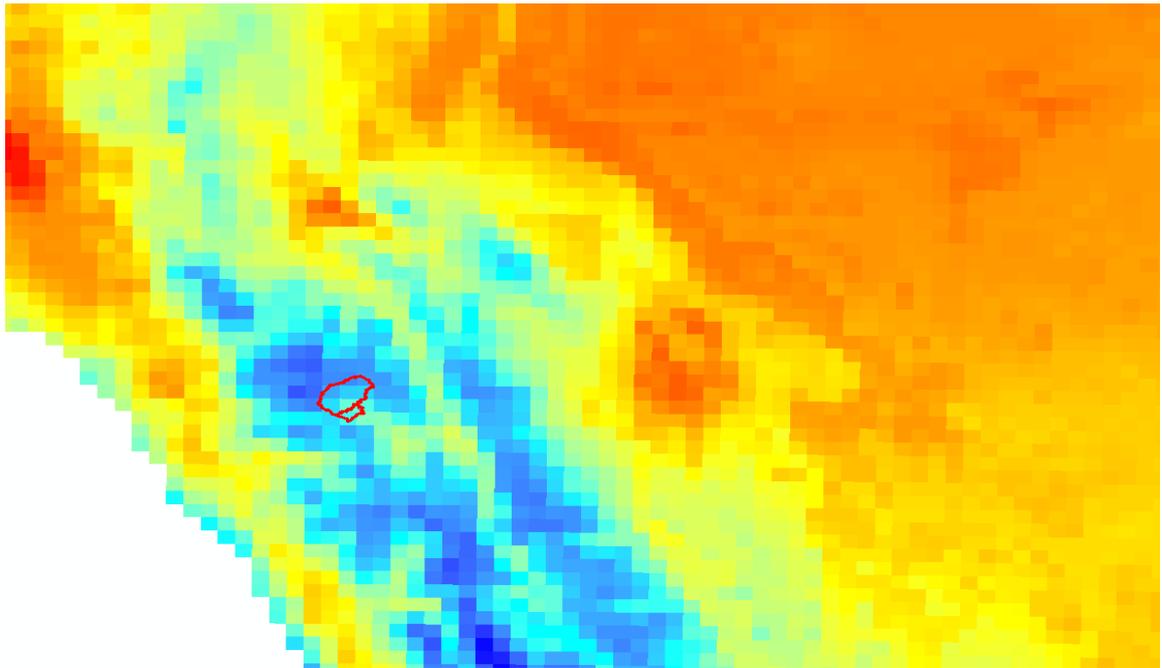
Fuente: EOS

3.4. Hidrología

3.4.1. Producto Grillado Pisco

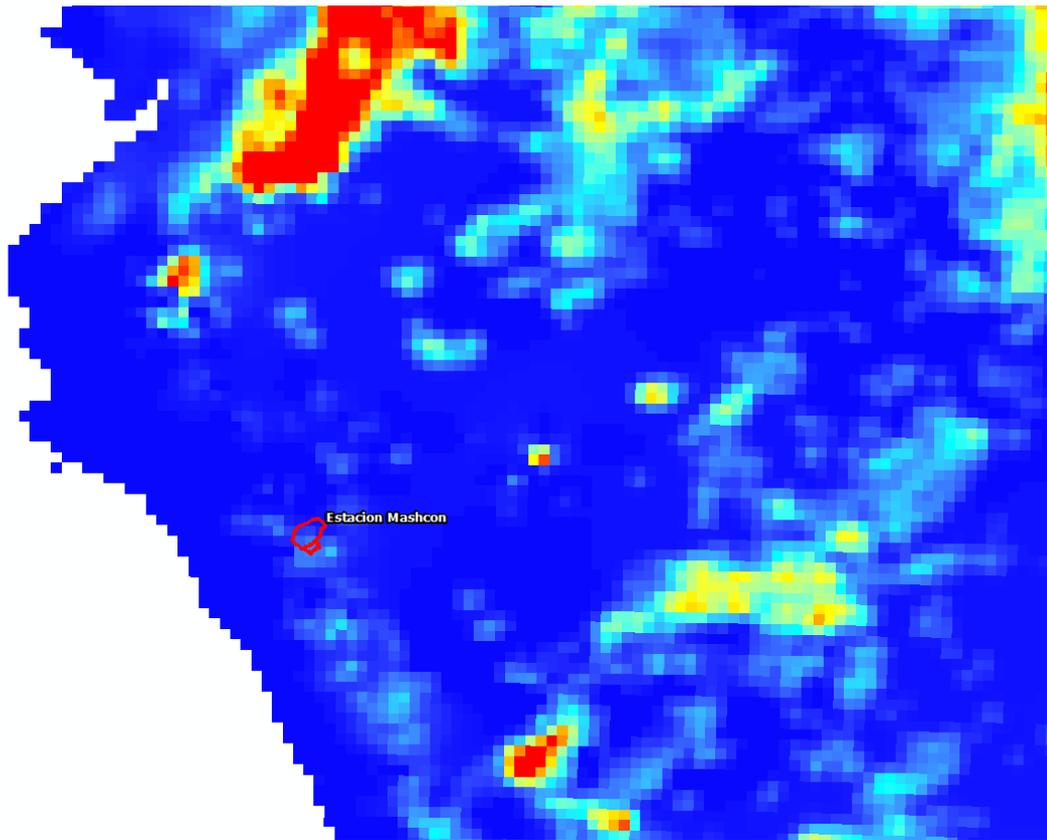
Para esto, se descargaron los datos del producto grillado **PISCO**, que incluyen la temperatura máxima y mínima, así como la precipitación máxima diaria. Estos datos abarcan el período de 1981 a 2016 y fueron calibrados en 2021, en una malla de 5 km x 5 km. A continuación, se muestran los datos de temperatura y precipitación:

Figura. 24: NCDF de temperatura, perteneciente al producto grillado Pisco.



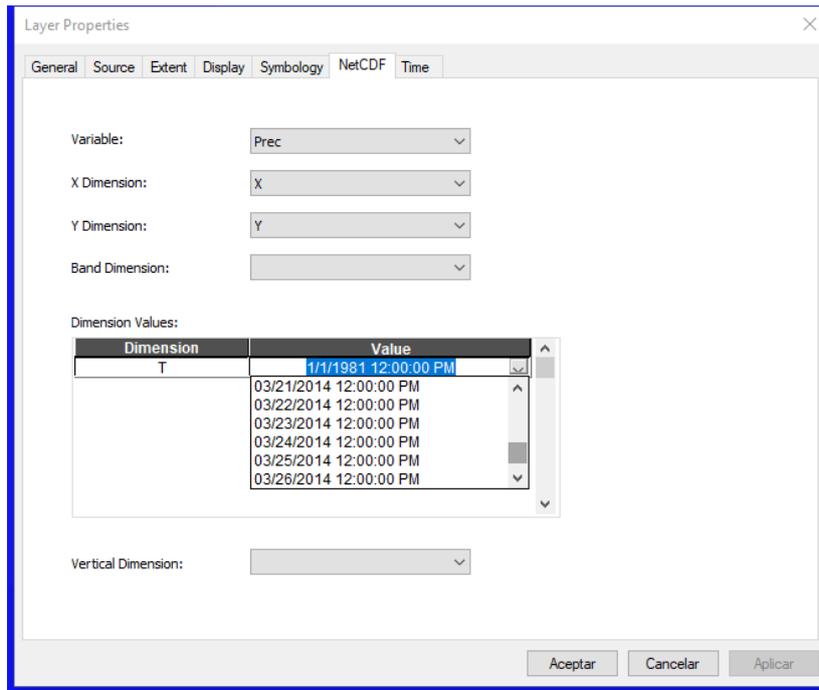
Fuente: SENAMHI

Figura. 25: NCDF de precipitación diaria, perteneciente al producto grillado Pisco.



Fuente: SENAMHI

Figura. 26: Capas de NetCDF, perteneciente al producto grillado Pisco.



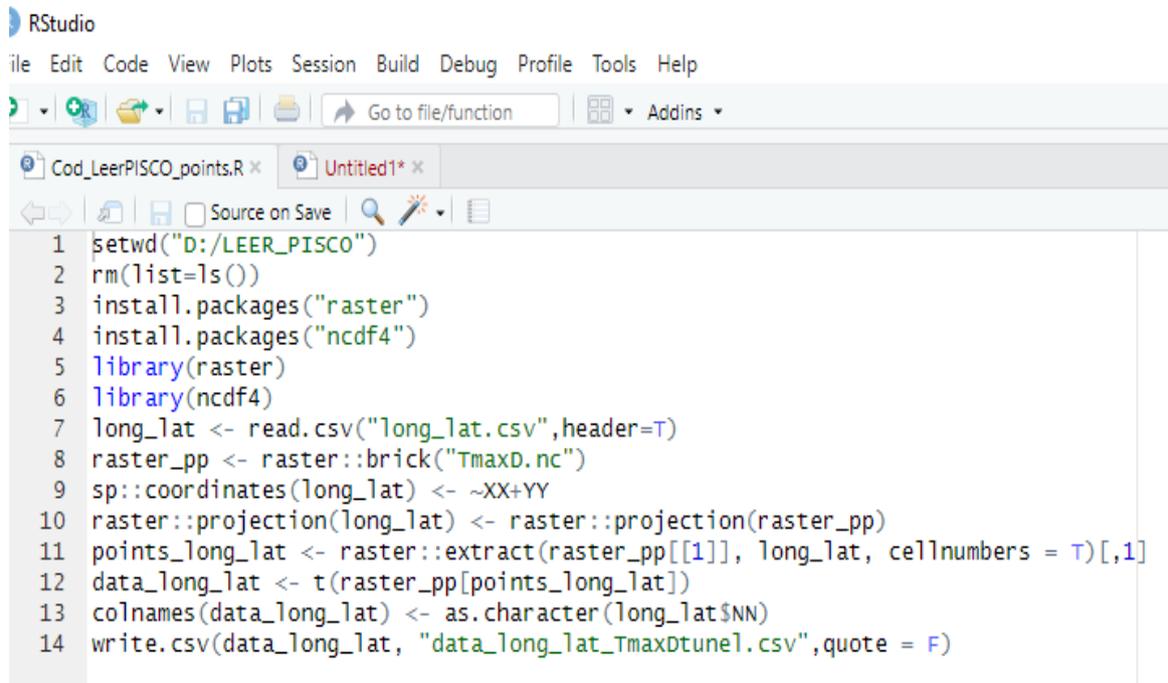
Extracción de los datos del Producto Grillado Pisco usando el lenguaje de programación R.

Es importante utilizar códigos de programación para extraer datos de archivos NetCDF y otras fuentes similares por la eficiencia que ofrece al gestionar grandes volúmenes de datos multidimensionales, la precisión que minimiza errores humanos, la escalabilidad para manejar datos más grandes y realizar extracciones regulares, y la capacidad de personalización según los requerimientos específicos. Además, garantiza la reproducibilidad en investigaciones científicas, facilita la automatización de tareas recurrentes, se integra en los flujos de trabajo, permite una manipulación flexible de los datos y asegura un manejo seguro, contribuyendo a la integridad de la investigación y la toma de decisiones basada en datos.

El lenguaje elegido fue R, conocido por su versatilidad. R es ampliamente utilizado en campos como la estadística, la ciencia de datos, la investigación científica, la visualización de datos y la bioinformática. Su amplia gama de bibliotecas y paquetes facilita el análisis y la manipulación de datos, haciéndolo ideal para la estadística descriptiva e

inferencial, la creación de gráficos personalizados y la implementación de algoritmos de aprendizaje automático. Al ser de código abierto y contar con una comunidad activa, R se actualiza continuamente con nuevas bibliotecas y recursos, adaptándose a diversas necesidades en la investigación científica, la toma de decisiones empresariales y la academia.

Figura. 27: Código en “R” para extraer los datos de la base de PISCO.



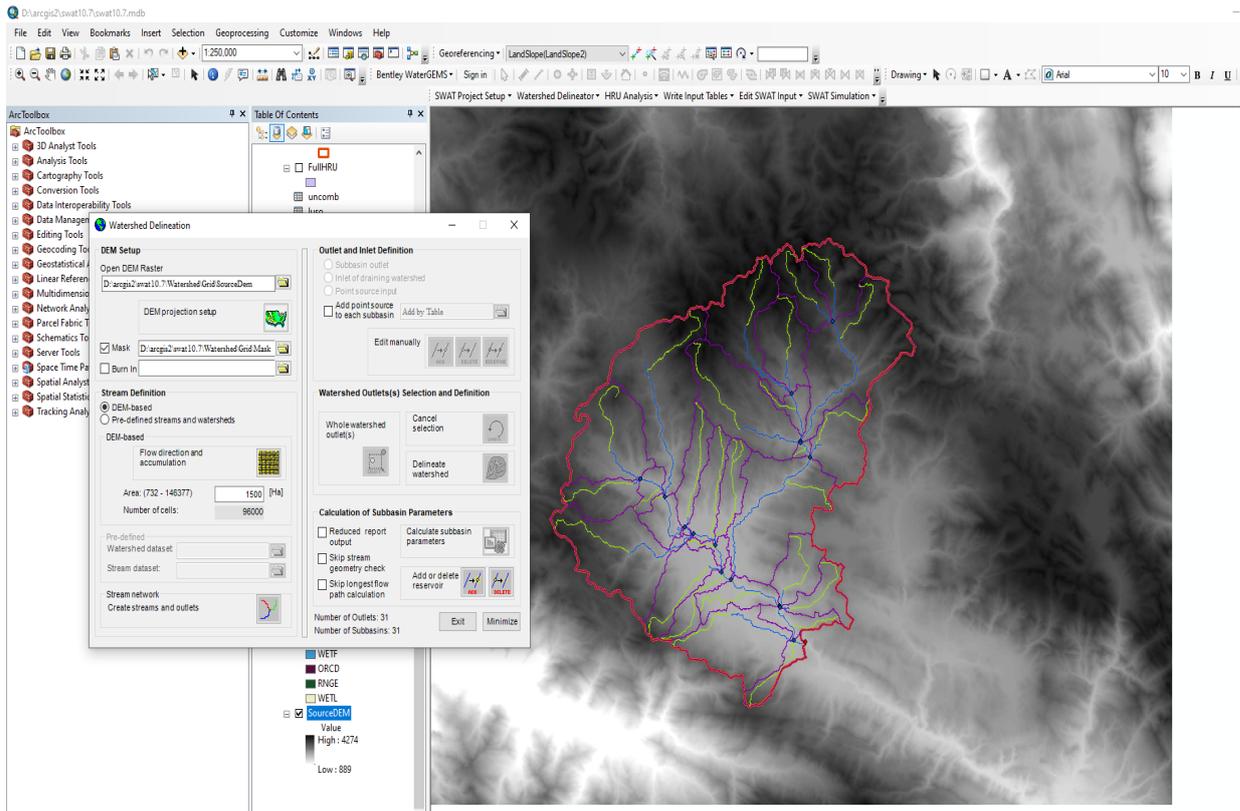
```
1 setwd("D:/LEER_PISCO")
2 rm(list=ls())
3 install.packages("raster")
4 install.packages("ncdf4")
5 library(raster)
6 library(ncdf4)
7 long_lat <- read.csv("long_lat.csv",header=T)
8 raster_pp <- raster::brick("TmaxD.nc")
9 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
10 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
11 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
12 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
13 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
14 write.csv(data_long_lat, "data_long_lat_TmaxDtune1.csv",quote = F)
```

Con este código, podemos extraer todos los datos del sensor elegido. Dado que los datos son diarios y cubren el período de 1981 a 2016, se superan los 13 mil registros, los cuales serán exportados a **Excel** para su procesamiento. Aunque los datos de **PISCO** ya están calibrados, se realizó un análisis de doble masa y una inspección gráfica visual, comparando los sensores más cercanos a la estación **Augusto Webervahuer** de la ciudad de **Cajamarca**, con el objetivo de verificar su exactitud y confiabilidad.

3.5. Uso del modelo SWAT para el cálculo de los caudales máximos diarios

El procedimiento para calcular los caudales máximos diarios comienza con la delimitación de la cuenca, realizada mediante el modelo **SWAT**, que se implementó en **ArcGIS** utilizando la variante **ARCSWAT**.

Figura. 28: Delimitación de la cuenca con ArcSwat.



El siguiente paso consiste en calcular las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), que se utilizan en el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), ampliamente empleado en la gestión de cuencas hidrográficas y la evaluación de la calidad del agua. Las HRU son una parte fundamental de la metodología del SWAT, permitiendo dividir la cuenca en unidades más pequeñas y homogéneas para mejorar la precisión en la modelización hidrológica.

Cada HRU en el modelo SWAT representa una sección de la cuenca que comparte características hidrológicas similares, tales como tipo de suelo, uso del terreno, pendiente, vegetación y condiciones climáticas. El objetivo de esta subdivisión es que, al dividir la cuenca en unidades más homogéneas, el modelo capture con mayor precisión los procesos hidrológicos y la dinámica del flujo de agua.

Para esto, se procesaron varios datos obtenidos de los DEM previamente mencionados, como la cobertura vegetal (EOS utilizando el método NDVI) y los usos del

suelo (descargados de la FAO). Con estos DEM, se calculó el Número de Curva, que será introducido en el modelo. Estos mapas se pueden observar en las siguientes imágenes:

Figura. 29: Cobertura Vegetal usando el método NDVI.

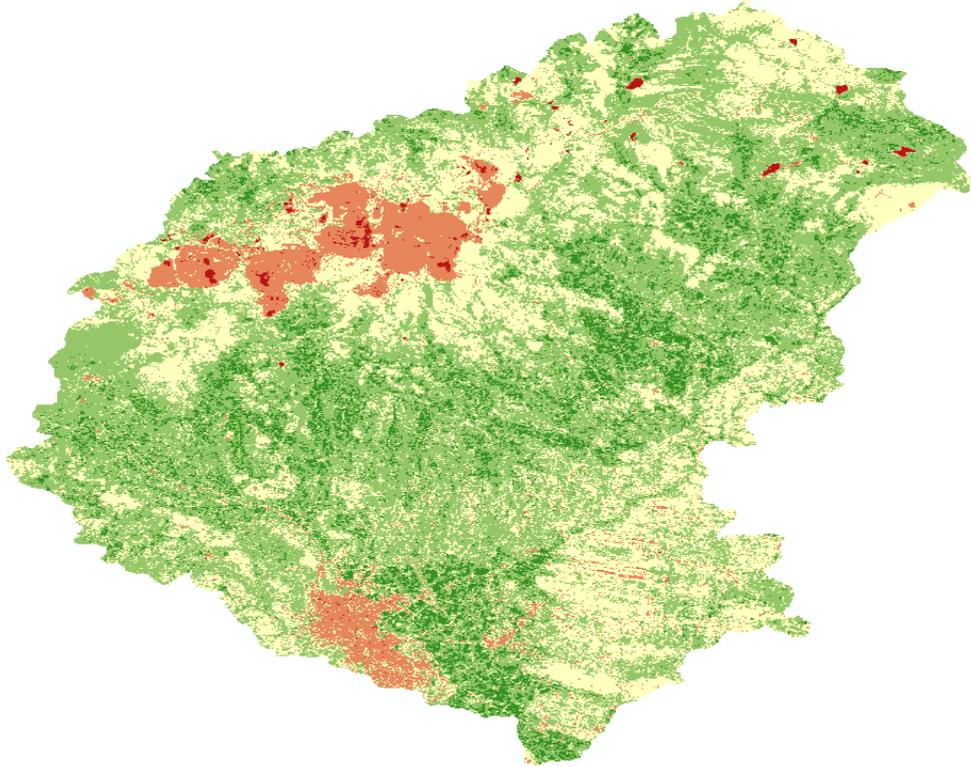


Figura. 30: Mapa de uso de Suelos.

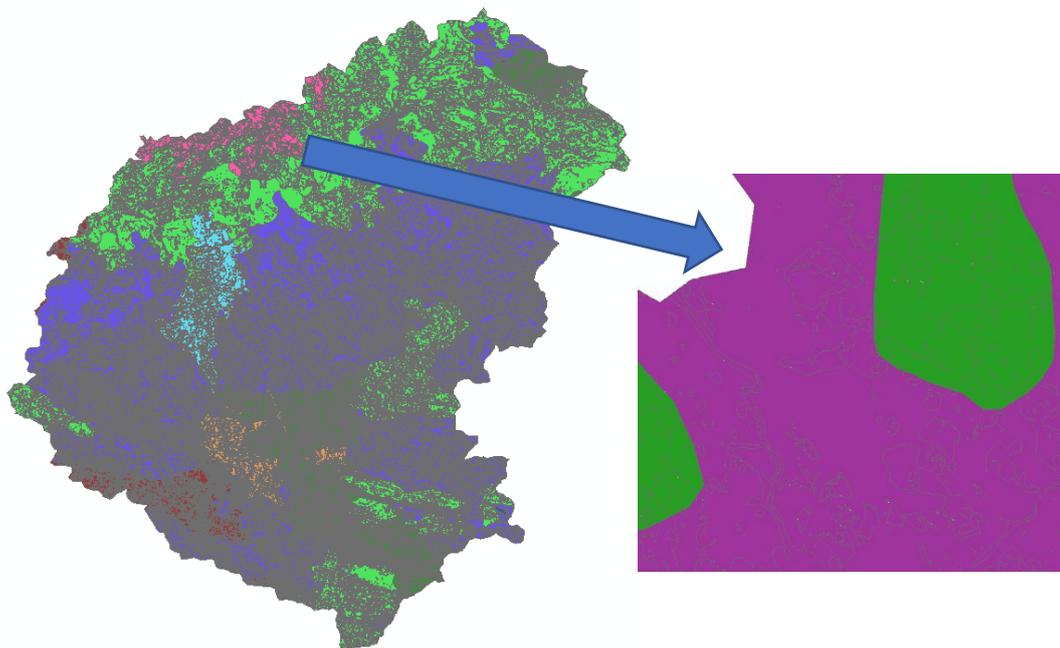


Figura. 31: Numero de Curva Calculado para cada Subcuenca.

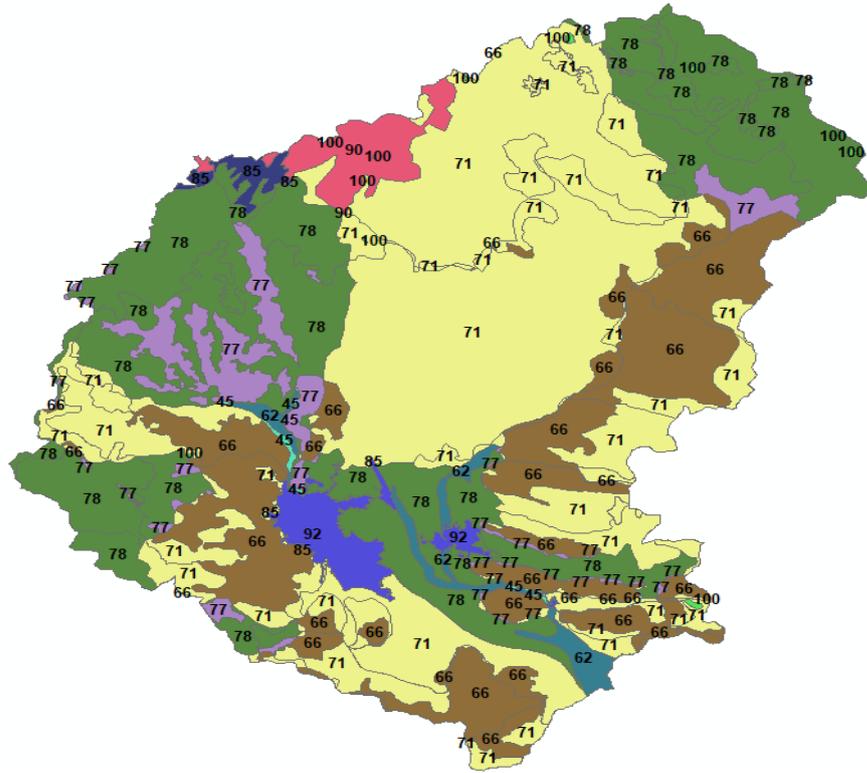


Figura. 32: Vista satelital de las cuencas analizadas.

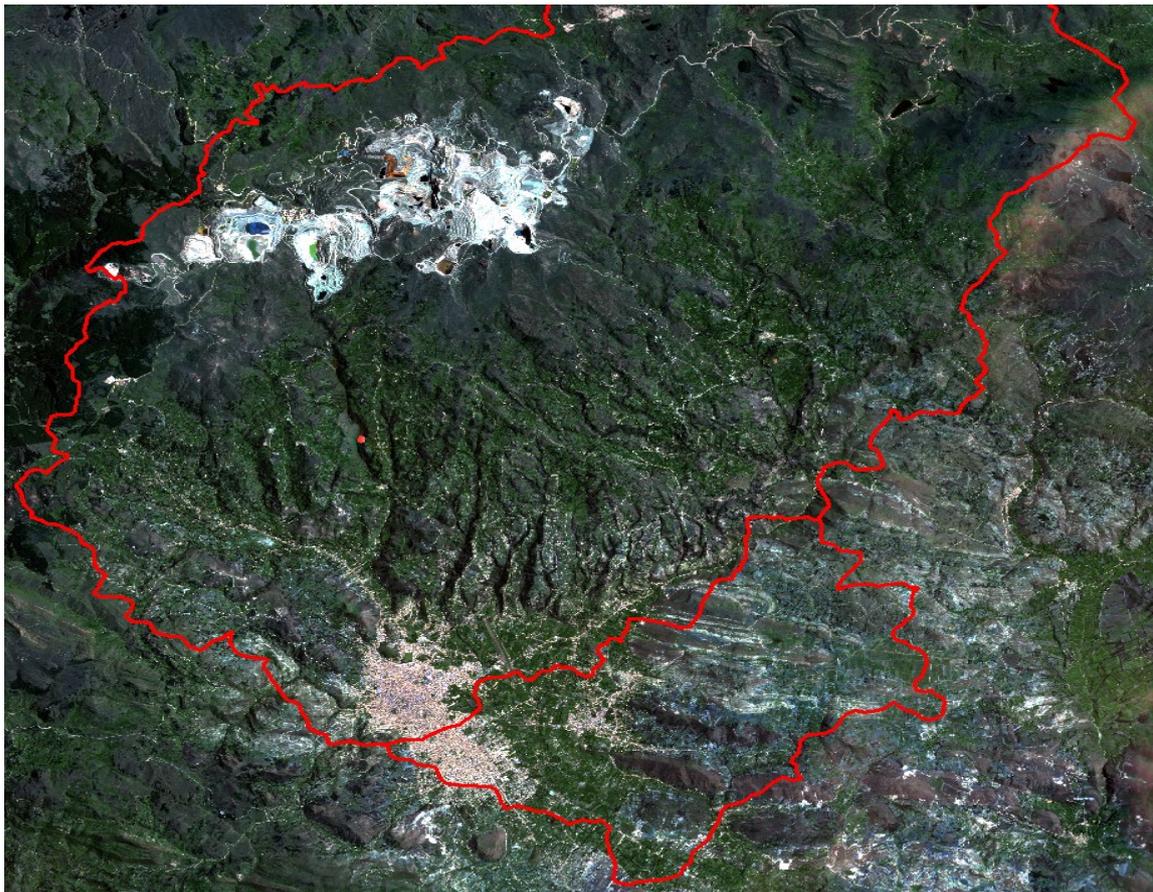


Figura. 33: Datos para el cálculo del número de Curva.

FID	Shape *	CobVeg2013	GRUPOHIDRO	LANDUSE	Desc_suelo	SoilCode	Pcta	Pctb	Pctc	Pctd	CN	
0	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Leptosol	B	100	0	0	0	71	
1	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Phaeozem-Leptosol	B	0	100	0	0	71	
2	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Phaeozem	B	0	100	0	0	71	
3	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Leptosol-Regosol	B	0	100	0	0	71	
4	Polygon	Agricultura costera y andina	C	4	Paramosol	C	0	0	100	0	78	
5	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Andosol-Leptosol	B	0	100	0	0	71	
6	Polygon	Agricultura costera y andina	C	4	Paramo andosol	C	0	0	100	0	78	
7	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Rendzina-Leptosol	B	0	100	0	0	71	
8	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Paramo andosol-Leptosol	B	0	100	0	0	71	
9	Polygon	Agricultura costera y andina	C	4	Phaeozem-Vertisol	C	0	0	100	0	78	
10	Polygon	Agricultura costera y andina	A	4	Fluvisol-Phaeozem	A	100	0	0	0	62	
11	Polygon	Agricultura costera y andina	A	4	Fluvisol	A	100	0	0	0	62	
12	Polygon	Agricultura costera y andina	B	4	Rendzina	B	0	100	0	0	71	
13	Polygon	Agricultura costera y andina	C	4	Vertisol	C	0	0	100	0	78	
14	Polygon	Area urbana	B	2	Phaeozem-Leptosol	B	0	100	0	0	85	
15	Polygon	Area urbana	B	2	Andosol-Leptosol	B	0	100	0	0	85	
16	Polygon	Area urbana	C	2	Phaeozem-Vertisol	C	0	0	100	0	90	
17	Polygon	Area urbana	D	2	Casco urbano	D	0	0	0	0	100	92
18	Polygon	Bofedal	C	4	Paramosol-Leptosol	C	0	0	100	0	78	
19	Polygon	Bofedal	C	4	Paramosol	C	0	0	100	0	78	
20	Polygon	Bofedal	B	4	Paramo andosol-Leptosol	B	0	100	0	0	71	
21	Polygon	Bosque xérico interandino	B	3	Leptosol	B	0	100	0	0	66	
22	Polygon	Bosque xérico interandino	B	3	Phaeozem-Leptosol	B	0	100	0	0	66	
23	Polygon	Bosque xérico interandino	C	3	Phaeozem-Vertisol	C	0	0	100	0	77	
24	Polygon	Bosque xérico interandino	A	3	Fluvisol-Phaeozem	A	100	0	0	0	62	

La preparación de los datos obtenidos de PISCO para ingresar al modelo SWAT son los siguientes:

Figura. 34: Datos de PISCO en Excel.

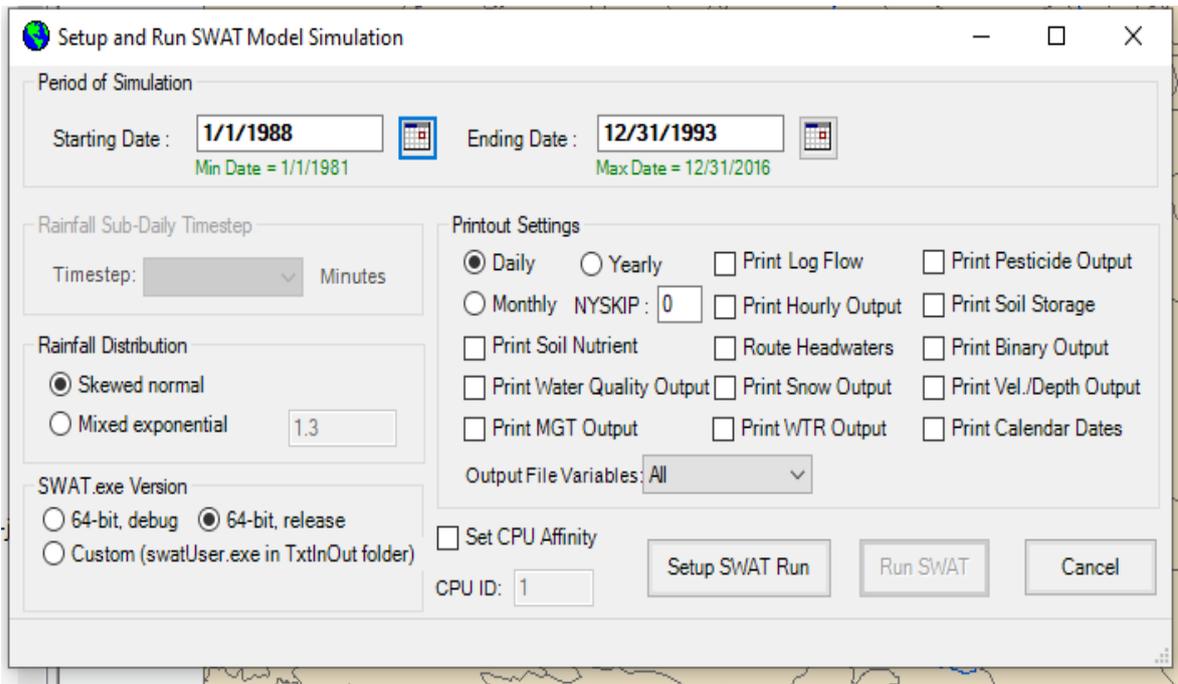
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	1/01/1981;18	2.454905986;3.282351732;5.361555576;2.869426012;1.131200194;0.950520694;1.010203123;2.276398181;3.589413166;5.87373257									
3	2/01/1981;18	4.511598587;5.329530715;6.784037113;4.539493560;3.318041324;3.302875757;3.343239545;4.609343528;5.287970066;7.33927679									
4	3/01/1981;18	6.922869682;7.711061954;9.655301094;6.960892200;5.863528728;5.512888431;5.467817783;6.601621150;7.680662631;10.1556606									
5	4/01/1981;15	6.203221797;6.972390174;8.803698539;6.274128437;5.141978263;4.721522808;4.687617778;5.779832363;6.979975700;9.30105305									
6	5/01/1981;18	3.839010238;4.670967578;6.776717662;4.044978618;2.720472335;2.369955539;2.399223089;3.578308343;4.805038452;7.25068235									
7	6/01/1981;15	4.171352386;4.964143753;7.443917751;4.417508602;2.940408468;2.686189889;2.711573600;3.906827449;5.121269226;7.95447874									
8	7/01/1981;15	7.702037811;8.463197708;10.17640686;7.736866950;6.692402839;6.297675609;6.262753963;7.341905117;8.437760353;10.6629944									
9	8/01/1981;15	6.674159049;7.459560871;9.336934089;6.701154708;5.578645706;5.095611095;5.035618305;6.144697189;7.422246456;9.86588669									
10	9/01/1981;16	6.123558521;6.905075073;8.937982559;6.167194366;5.022331714;4.729410648;4.707180976;5.842498779;6.882316112;9.47415829									
11	10/01/1981;16	7.81882762;7.538304328;9.193379402;6.760369300;5.695654392;5.327581882;5.279184341;6.376951217;7.455008029;9.74071693									
12	11/01/1981;14	3.41474056;5.188507556;7.712718399;4.431608200;3.038568019;2.854031085;2.887010812;4.172403812;5.183281898;8.31856632									
13	12/01/1981;17	1.61152362;8.038685798;9.508373260;6.974118232;6.034969329;5.643767356;5.77247619;6.833461284;7.797894001;10.1129675									
14	13/01/1981;17	1.11970424;7.955034732;10.00914669;7.155759334;5.942648410;5.463984012;5.393924713;6.591198444;7.923947811;10.5760307									
15	14/01/1981;16	2.70389080;7.032984256;8.451777458;6.423202037;5.056247711;4.762453556;4.741824150;5.886488914;7.105996131;9.01089382									
16	15/01/1981;17	0.25980472;7.794707298;9.482675552;7.045157432;5.992599487;5.599091529;5.561517715;6.654483318;7.753385066;9.98889828									
17	16/01/1981;14	6.99940204;5.590807437;8.22146415;4.791023254;3.459163188;2.962378263;2.925276041;4.185566902;5.606012344;8.40153217									
18	17/01/1981;16	9.20014858;7.765717506;9.501882553;6.901225090;5.768927097;5.217666625;5.147431373;6.336782932;7.680529117;10.0725927									
19	18/01/1981;16	742373943;7.574604034;9.441608428;6.740154743;5.642210960;5.234380245;5.199108600;6.387136459;7.508370399;9.98023701									
20	19/01/1981;16	781516075;7.614514827;8.760634422;6.622528076;5.728215217;5.382494926;5.341686725;6.543791770;7.411615848;9.2958765									
21	20/01/1981;17	097233295;7.895685672;10.04153919;7.055091381;6.015530109;5.555817127;5.464335918;6.614338397;7.776387214;10.5861607									
22	21/01/1981;17	025415897;7.825594425;9.456502914;7.063542842;5.926166534;5.418078899;5.355467319;6.478534698;7.799966812;9.98290443									
23	22/01/1981;14	646977901;5.521902561;7.279203891;4.589549541;3.567006587;3.148795604;3.110071659;4.340113162;5.408438205;7.82103682									
24	23/01/1981;14	184681415;5.045652866;5.927459716;4.285835266;2.943598747;2.318624496;2.284775018;3.490808486;5.072075366;6.51608038									
25	24/01/1981;15	880366325;6.696009159;4.873481750;5.926735877;4.371996402;2.911193609;2.739501476;3.846343278;6.672887325;5.47625685									
26	25/01/1981;15	077104568;5.880980014;7.109053611;5.111722469;3.975704431;3.449715852;3.399502277;4.532631397;5.853417396;7.62051439									

Figura. 35: Datos preparados para ingresar al modelo SWAT.

```
X2.txt: Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato
19810101
0.003276751
0.243270636
1.301662922
0.021935236
0
0.15238525
1.31128943
4.400469303
16.59098625
16.12921906
2.769140959
3.140773535
5.071063519
0
0.987809181
0.002390178
```

Una vez completados los pasos anteriores, se procede a calcular los caudales mediante la ejecución del modelo SWAT, obteniendo resultados que abarcan desde 1981 hasta 2016. El modelo SWAT genera estos resultados en una base de datos ACCESS.

Figura. 36: Configuración final para correr el modelo SWAT.



En la imagen anterior, se observa la configuración de los datos. En primer lugar, se indica la fecha en la que se generarán los caudales, utilizando los datos de calibración que abarcan el período 1988-1993, lo que ayuda a ahorrar tiempo computacional (esto no afecta

los resultados del modelo, ya que solo se limita el período de cálculo). Las otras dos opciones seleccionadas son "Daily", debido a que se introdujeron datos diarios, y la distribución de lluvia (**Rainfall Distribution**), configurada en modo normal, en lugar del mixto exponencial, ya que no se dispone de datos para esta última opción.

3.6. Calibración y validación del modelo:

Para realizar la calibración y validación del modelo, se utilizó el complemento **SWAT-CUP**, una herramienta valiosa para investigadores y profesionales que trabajan en la gestión de recursos hídricos, evaluación de cuencas hidrográficas y modelización de procesos hidrológicos. Este complemento mejora la precisión y confiabilidad de las simulaciones del modelo **SWAT** al permitir una calibración más detallada y comprender mejor la incertidumbre asociada con las predicciones del modelo. **SWAT-CUP** realiza iteraciones sobre los parámetros que afectan el modelo **SWAT**, con el objetivo de ajustar los caudales lo más cerca posible de los observados (Paulo de Sousa Oliveira, 2022).

La calibración se realizó utilizando la estación **Mashcón**, ajustando los 24 principales parámetros que intervienen en el modelo **SWAT** de la siguiente manera:

Figura. 37: Parámetros a Calibrar del modelo SWAT.

#	Par Name	File Name	File Ext.	Method	Min	Max	Hydro Grp	Soil Texture	Landuse	Subbasins	Slope	Condition_Filter	Layers/Columns	Properties
1	ALPHA_BF		.gwr	V Replace	0.01	1				(All)				
2	GW_DELAY		.gwr	V Replace	0.01	500				(All)				
3	GW_REVAP		.gwr	V Replace	0.02	0.2				(All)				
4	GWQMN		.gwr	V Replace	0.01	5000				(All)				
5	REVAPMN		.gwr	V Replace	0.01	500				(All)				
6	ESCO		.hru	V Replace	0.01	1				(All)				
7	EPCO		.hru	V Replace	0.01	1				(All)				
8	CANFX		.hru	V Replace	0.01	100				(All)				
9	T1MP		.bsn	V Replace	0.01	1				(All)				
10	SMFHYX		.bsn	V Replace	0.01	10				(All)				
11	SMFMN		.bsn	V Replace	0.01	10				(All)				
12	SFTMP		.bsn	V Replace	0.01	5				(All)				
13	SMTMP		.bsn	V Replace	0.01	5				(All)				
14	SURLAG		.bsn	V Replace	1	24				(All)				
15	CH_K2		.rte	V Replace	0.01	250				(All)				
16	CH_N2		.rte	V Replace	-0.01	0.3				(All)				
17	CR2		.mgt	F Relative	-0.3	0.3				(All)				
18	TLAPS		.sub	V Replace	-10	10				(All)				
19	SHALLST		.gwr	V Replace	0.01	1000				(All)				
20	DEEPTST		.gwr	V Replace	0.01	5000				(All)				
21	RCHRG_DP		.gwr	V Replace	0.01	1				(All)				
22	GWHT		.gwr	V Replace	0.01	25				(All)				
23	GW_SPLYD		.gwr	V Replace	0.01	0.4				(All)				
24	BIOHDX		.mgt	V Replace	0.01	1				(All)				

Tabla 9: Parámetros de calibración.

N°	Parámetro	Definición
1	PLAPS.sub	Tasa de disminución de precipitación
2	TLAPS.sub	Tasa de disminución de temperatura
3	SUB_SFTMP().sno	Temperatura de caída de nieve
4	SUB_SMTMP().sno	Temperatura base de fusión de nieve
5	SUB_SMFMX().sno	Factor de fusión para nieve el 21 de diciembre
6	SUB_SMFMN().sno	Factor de fusión para nieve el 21 de junio
7	SUB_TIMP().sno	Factor de retraso de temperatura del paquete de nieve
8	CN2.mgt	Número de curva de escorrentía del SCS
9	SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo
10	ESCO.hru	Factor de compensación de absorción de plantas
11	HRU_SLP.hru	Pendiente promedio
12	OV_N.hru	Valor "n" de Manning para flujo superficial
13	SLSUBBSN.hru	Longitud promedio de la pendiente
14	GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea
15	GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero superficial requerida para que ocurra el flujo de retorno
16	GW_REVAP.gw	Retraso del agua subterránea
17	REVAPMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero superficial para que ocurra la "revaporación"
18	SHALLST.gw	Profundidad inicial del agua en el acuífero superficial
19	ALPHA_BF.gw	Factor alfa de caudal base

Los datos sin calibrar se muestran a continuación:

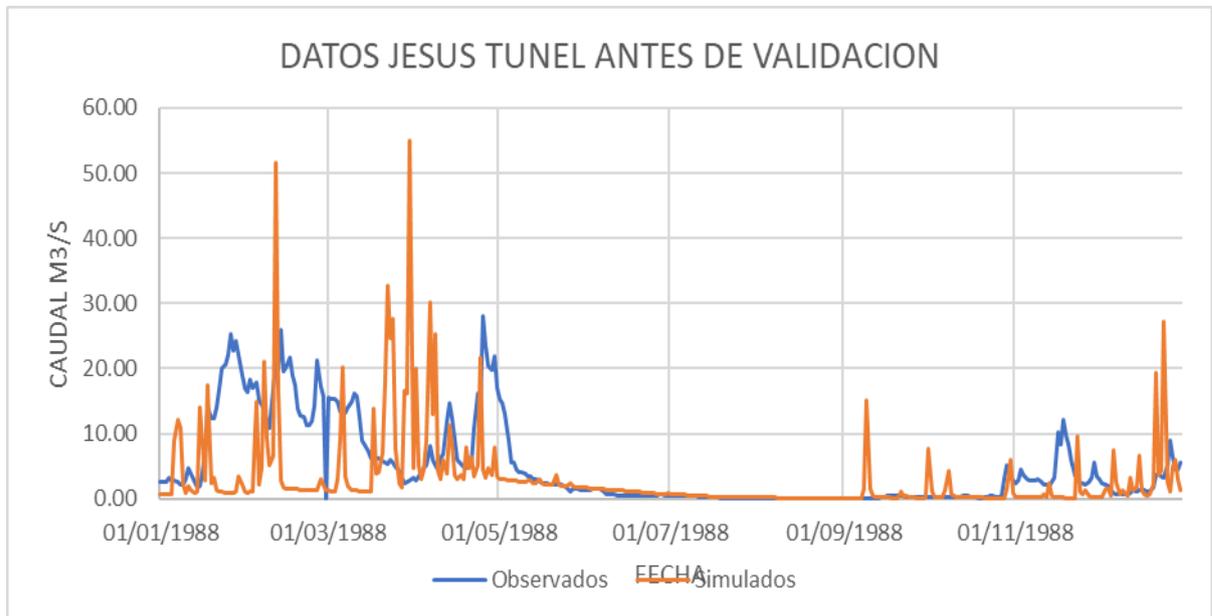
Figura. 38: Datos simulados vs datos observados.



En la estación Mashcón para el proceso de Calibración.

Una vez realizado el proceso de calibración, se realiza el proceso de validación, ingresando los parámetros obtenidos en la calibración, al nuevo modelo y así obteniendo los caudales finales, los datos sin validar se muestran a continuación:

Figura. 39: Datos simulados vs datos observados.

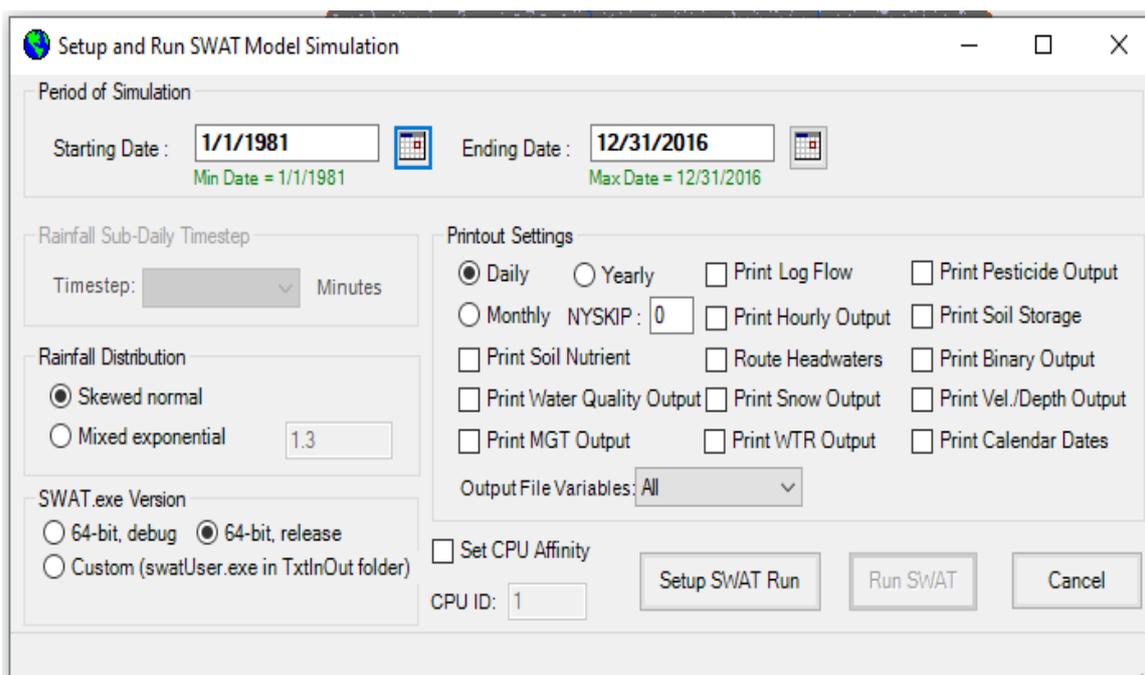


Datos en la estación Jesús Túnel para el proceso de validación.

3.7. Generación de caudales para la data total:

Una vez calibrado y validado el modelo, se tienen todos los parámetros necesarios para generar los datos correspondientes a los años proporcionados por la base de datos **PISCO**, que abarca desde 1981 hasta 2016. Los datos generados son diarios, con un total de 13,150 registros simulados, calibrados y validados.

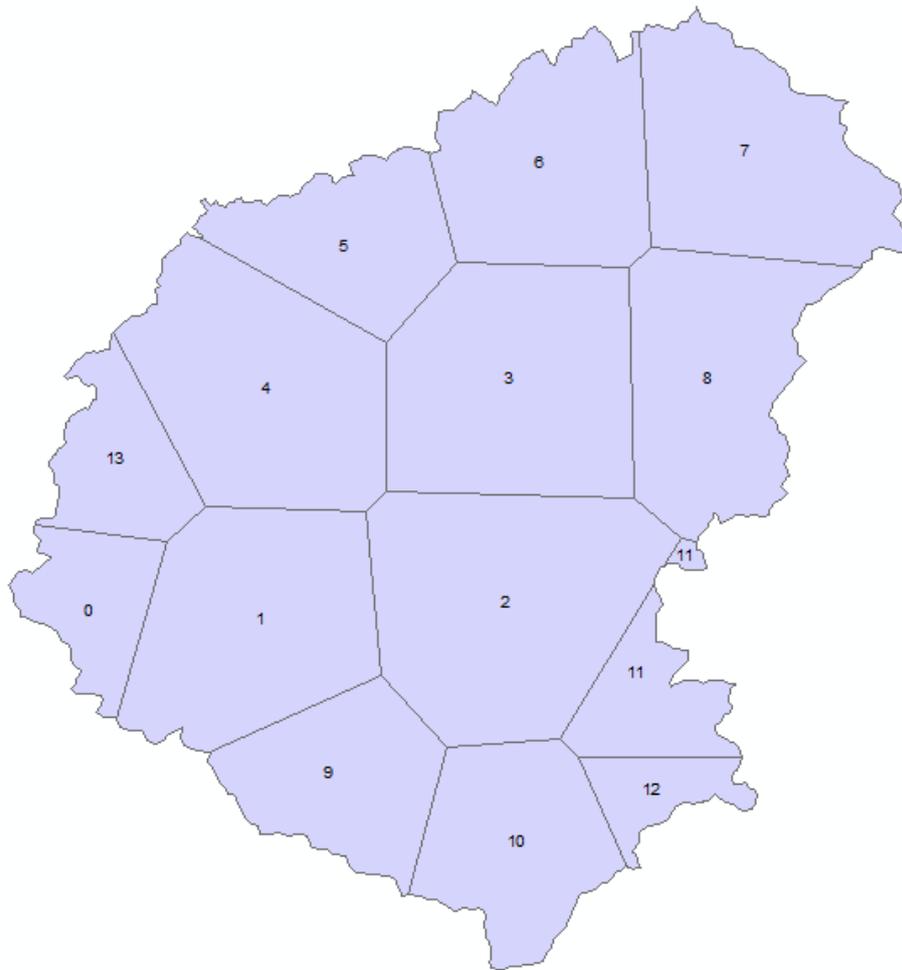
Figura. 40: Configuración final para la generación de datos completa.



3.8. Balance Hídrico:

Con los datos diarios de caudales generados, la evapotranspiración potencial diaria, y las temperaturas máximas y mínimas diarias obtenidos de la simulación en **SWAT** y del producto **PISCO**, se procede a realizar el balance hídrico diario. Para ello, es necesario realizar algunas transformaciones. Primero, como se tienen 14 sensores y estos no tienen áreas de influencia iguales, se hace un promedio de los datos utilizando Polígonos de Thiessen en ArcGIS:

Figura. 41: Polígonos de Thiessen usando los sensores de PISCO.



Los coeficientes para el cálculo de los datos promedio serían los siguientes:

Tabla 10: Coeficientes de polígonos de Thiessen.

Sensor	Coeficiente Thiessen
Sensor 1	0.03366
Sensor 2	0.09799
Sensor 3	0.12063
Sensor 4	0.10856
Sensor 5	0.10476
Sensor 6	0.05697
Sensor 7	0.08174
Sensor 8	0.09193
Sensor 9	0.08800
Sensor 10	0.05996
Sensor 11	0.06511
Sensor 12	0.03356
Sensor 13	0.01902
Sensor 14	0.03811

- *Precipitación:*

Teniendo los coeficientes de Thiessen y las precipitaciones máximas diarias de los 14 sensores en mm, procedemos a calcular la precipitación promedio y luego transformar a m³/d por día.

Tabla 11: *Precipitaciones promedio en m³/d.*

FECHA	PRECIPITACIÓN (mm/d)	PRECIPITACIÓN (m ³ /d)
1/1/1981	0.009347174	7196.194927
1/2/1981	0.710163309	546739.9456
1/3/1981	2.039489083	1570160.181
1/4/1981	0.125772073	96829.30017
1/5/1981	0.003508953	2701.469904
1/6/1981	5.608409258	4317797.514
1/7/1981	2.877083477	2215006.665
1/8/1981	8.258772857	6358257.266
1/9/1981	5.856308565	4508650.029
1/10/1981	9.163957274	7055139.902
...
12/31/2016	10.50686056	8089013.183

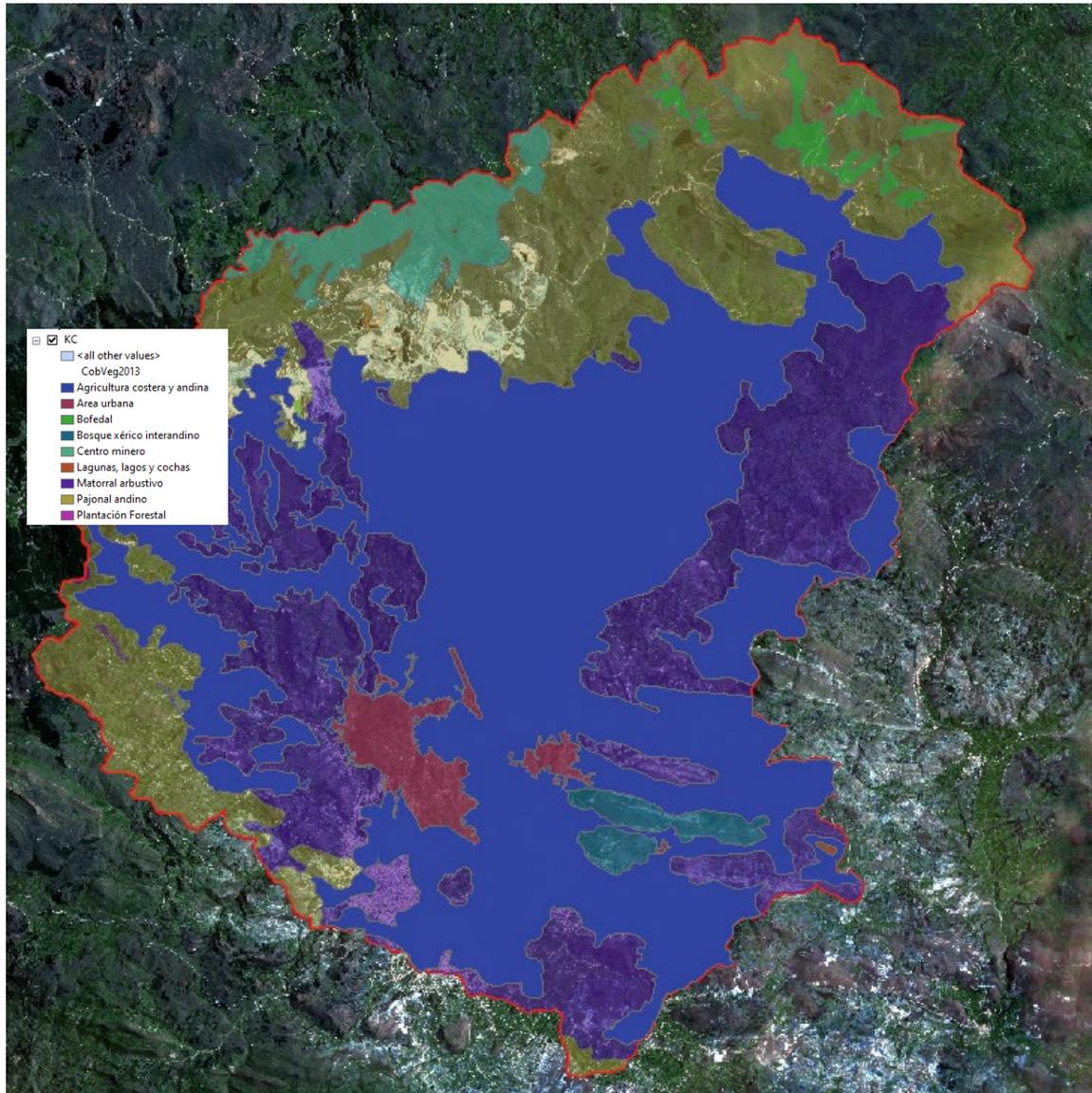
- *Evapotranspiración real:*

La base de datos PISCO nos proporciona la Evapotranspiración Potencial. Para realizar un balance hídrico óptimo, debemos obtener la Evapotranspiración Real de Cultivo, para lo cual es necesario calcular el Kc (coeficiente de cultivo).

Primero, calculamos la Evapotranspiración Potencial Promedio de manera similar a como se obtuvo la Precipitación Promedio, en metros cúbicos por día (m³/d).

Luego, aprovechando los mapas y la base de datos de la FAO sobre el uso del suelo, podemos obtener el coeficiente Kc con la ayuda de estos mapas.

Figura. 42: Tipos de suelos dados por la FAO para la obtención de Kc.



Se obtuvieron los mapas de los tipos de suelos a partir de la FAO, delimitados por cada tipo de suelo según la leyenda.

Con los tipos de suelos y sus respectivas áreas, se procede a calcular el Kc promedio, de la misma manera en que se calculó el promedio de la evapotranspiración. El Kc de cada una de las áreas fue obtenido de las tablas citadas en el Capítulo II.

Tabla 12: *Calculo del Kc promedio.*

Item.	Cobertura Vegetal FAO	Área	Área %	Código De Suelo Fao	Tipo De Cultivo	Kc Ponderado Por Año	Kc Promedio
1	Agricultura costera y andina	347972635.3	0.451244935	WATR	no aplicable	1	0.451244935
2	Area urbana	16917808.09	0.021938723	WATR	no aplicable	1	0.021938723
3	Bofedal	9906654.092	0.012846779	FRSD	valores de uso para Robles	0.75	0.009635084
4	Bosque xérico interandino	9679385.024	0.01255206	AGRL	valores de uso para el Sorgo de Granos	0.87	0.010920292
5	Centro minero	23149871.53	0.030020356	WETF	valores de uso para Robles	0.75	0.022515267
6	Lagunas, lagos y cochas	716113.978	0.000928644	ORCD	valores de uso para Manzanos	1.15	0.001067941
7	Matorral arbustivo	162960894.8	0.211324889	RNGE	valores de uso para Pequeña Bluestem (LAI _{max} =2.5)	0.65	0.137361178
8	Pajonal andino	198609378.4	0.25755323	WETL	valores de uso para Pasto Alamo	0.6	0.154531938
9	Plantación Forestal	1226408.065	0.001590385	FRSE	valores de uso para Pinos	0.5	0.000795192

Luego teniendo este Kc calculamos la ETc.

Tabla 13: *Evapotranspiración Real promedio en m³/d.*

FECHA	ETR (mm/d)	ETR (m ³ /d)
1/1/1981	2.670230649	1665161.534
1/2/1981	2.989860591	1864483.448
1/3/1981	2.788449213	1738882.882
1/4/1981	2.884013872	1798477.207
1/5/1981	2.253628277	1405367.405
1/6/1981	2.181715855	1360522.665
1/7/1981	2.165712529	1350542.957
1/8/1981	2.191954302	1366907.382
1/9/1981	2.191128359	1366392.323
1/10/1981	2.118427232	1321055.744
...
12/31/2016	2.221535432	1385354.238

- *Caudales:*

Los caudales calculados con **SWAT** están expresados en **cm³/s**. Es necesario transformarlos a **m³/d** para poder realizar el balance hídrico. La transformación se realizaría de la siguiente manera:

1. **Multiplicar el caudal en cm³/s por 86,400** (el número de segundos en un día) para obtener el volumen en **cm³/d**.
2. **Dividir el resultado entre 1,000,000** para convertir de **cm³/d a m³/d**.

De esta manera, el caudal quedará expresado en **m³/d**, listo para utilizarse en el balance hídrico:

Tabla 14: *Caudales calculados en m³/d.*

FECHA	Caudal (cm ³ /s)	Caudal (m ³ /d)
1/1/1981	0	0
1/2/1981	0	0
1/3/1981	0	0
1/4/1981	0	0
1/5/1981	0	0
1/6/1981	0.3051	0.02636064
1/7/1981	0.4372	0.03777408
1/8/1981	1.962	0.1695168
1/9/1981	2.032	0.1755648
1/10/1981	2.733	0.2361312
...
12/31/2016	12.68	1.095552

Con esto podemos calcular el balance Hídrico por día para la zona de estudio:

Tabla 15: *Balance Hidrico por dia en m³/d.*

FECHA	ΔS (m ³ /d)
1/1/1981	-1657965.339
1/2/1981	-1317743.502
1/3/1981	-168722.7016
1/4/1981	-1701647.907
1/5/1981	-1402665.935
1/6/1981	2957274.823

1/7/1981	864463.6703
1/8/1981	4991349.714
1/9/1981	3142257.531
1/10/1981	5734083.921
1/11/1981	522512.0979

3.9. Cálculo del índice de sequía:

El cálculo del SPI o Índice Estandarizado de Precipitación, que se utiliza para determinar el índice de sequía, requiere de métodos estadísticos, los cuales se vieron en el Capítulo II. Este índice se calcula para intervalos de 3, 6 y 12 meses, aplicando el mismo proceso en todos los casos. Se empleó una hoja de cálculo en Excel para sumar los meses de análisis, y luego los datos se ajustaron a una distribución Gumbel de 2 parámetros usando las fórmulas del capítulo anterior. Posteriormente, se ajustaron a una distribución normal inversa, resultando en el índice estandarizado de precipitación, el cual, según la Tabla N°7, proporciona el índice de sequía deseado.

La metodología es la siguiente:

- Recopilación de datos: Se obtienen datos históricos de precipitación para una ubicación específica durante un período de tiempo determinado (mensual o anual).
- Cálculo del promedio y la desviación estándar: Se calculan el promedio y la desviación estándar de los datos de precipitación.
- Transformación logarítmica: Se aplica una transformación logarítmica para aproximar los datos a una distribución normal, facilitando el cálculo de la probabilidad acumulada.
- Cálculo del SPI: Con el promedio y la desviación estándar, se calcula el SPI para cada período usando la fórmula del Capítulo II.

- Interpretación del SPI: Los valores calculados del SPI se interpretan, indicando condiciones más húmedas o más secas en función de si los valores son positivos o negativos, respectivamente.
- Clasificación de condiciones climáticas: Los valores de SPI se clasifican en categorías como "Sequía Severa", "Sequía Moderada", "Normal", etc.

Los cálculos en Excel siguen el siguiente patrón:

Tabla 16: *Calculo del Índice de sequía mediante la metodología SPI.*

AÑO	A=PREC (sumatoria de meses a analizar)	B=LN PREC (Logaritmo natural de la columna B)	Ajuste Gamma de la columna C	SPI= Ajuste de la columna C a la distribución Normal invertida	CONDICIÓN
1981	12.86943733	2.55	0.72	0.68	Moderadamente Húmedo
1982	8.326047299	2.12	0.14	-1.28	Sequía Severa
1983	12.12018209	2.49	0.63	0.38	Normal
1984	12.84002297	2.55	0.72	0.66	Moderadamente Húmedo
1985	4.743482051	1.56	0.00	-1.73	Sequía Extrema
1986	9.433062893	2.24	0.26	-0.86	Sequía Moderada

3.10. Impacto Para Uso Agrícola De Las Sequias En Las Cuencas Del Río Mashcón Y Chonta

La determinación del impacto para el uso agrícola fue determinada con la tabla 8 y graficada respecto a las sequias calculadas previamente vs los meses del año.

3.11. Extensión de datos para períodos futuros:

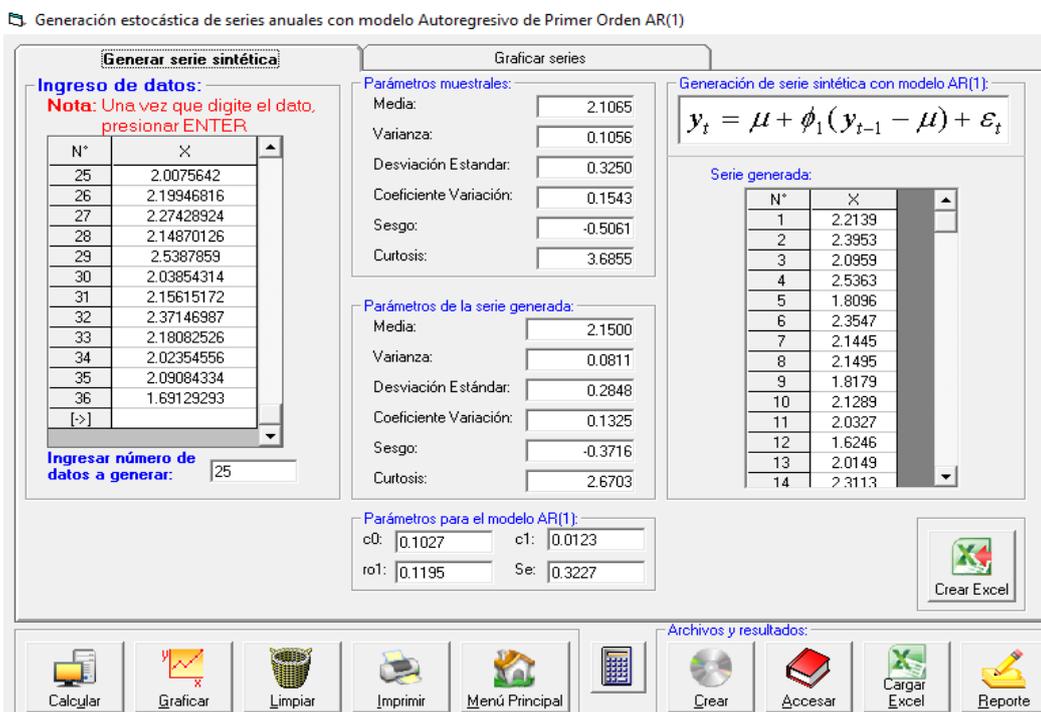
La determinación del impacto en el uso agrícola se realizó utilizando la Tabla 8, y se graficó en relación con las sequías calculadas previamente en función de los meses del año:

Figura. 43: Pasos para realizar la extensión AR(1) en Hidroesta2.



En la presente investigación se llevará a cabo la extensión de los datos de **precipitación, evapotranspiración y caudales** para el cálculo del **balance hídrico**. Asimismo, se realizará una extensión de los datos del **SPI** (Índice Estandarizado de Precipitación) calculados anteriormente, con el fin de estimar el **índice de sequía** futuro.

Figura. 44: Calculo de los parámetros de la serie ingresada y generada en Hidroesta2.



3.12. Materiales y Métodos:

Materiales:

1. **Imágenes Satelitales del Satélite ALOS:**

- **Sensor PALSAR** (Radar de Apertura Sintética en Banda L de Matriz Faseada).
- Imágenes con resolución espacial de **6,25 o 12,5 metros**.
- Polarizaciones disponibles: **HH o VV**.
- Disponibles en formato **CEOS**.
- Accesibles a través del portal de datos VERTEX.

2. **Mapas de Uso de Suelos de la FAO:**

- Datos de cobertura de suelo a nivel global.
- Proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

3. **Datos de Cobertura Vegetal para el Análisis NDVI:**

- Imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2.
- Accesibles a través de Land Viewer, una plataforma en línea desarrollada por EOS Inc.

4. **Datos de Hidrología - Producto Grillado Pisco:**

- Datos de temperatura máxima y mínima, así como la precipitación máxima diaria.
- Disponibles desde 1981 hasta 2016.
- Descargados del producto grillado PISCO.

5. **Model SWAT (Soil and Water Assessment Tool):**

- Implementado en ArcGIS, utilizando la variante ARCSWAT.
- Datos DEM (Modelos de Elevación Digital) para delimitar la cuenca y calcular las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica).
- Datos de cobertura vegetal, uso de suelos, y otros datos obtenidos de las fuentes mencionadas anteriormente.

6. **Complemento SWAT-CUP:**

- Utilizado para la calibración y validación del modelo SWAT.

- Herramienta para mejorar la precisión y confiabilidad de las simulaciones hidrológicas.
- 7. Software de Análisis Estadístico (posiblemente R):**
- Utilizado para la extracción de datos del Producto Grillado PISCO y posiblemente para otros análisis estadísticos.
- 8. Software Hydroesta 2:**
- Utilizado para la extensión de datos de precipitación, evapotranspiración, caudales, y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

Métodos:

- 9. Procesamiento de Imágenes Satelitales:**
- Uso de datos del satélite ALOS para generar Modelos de Elevación Digital (DEM).
- 10. Análisis de Uso de Suelos:**
- Empleo de datos de cobertura de suelo proporcionados por la FAO para identificar y clasificar los distintos tipos de suelo.
- 11. Análisis de Cobertura Vegetal:**
- Uso de imágenes satelitales para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).
- 12. Hidrología y Modelado SWAT:**
- Aplicación del modelo SWAT para el cálculo de caudales máximos diarios, utilizando datos DEM, cobertura vegetal, uso de suelos, y otros datos hidrológicos.
- 13. Calibración y Validación del Modelo:**
- Uso del complemento SWAT-CUP para la calibración y validación del modelo SWAT.
- 14. Balance Hídrico:**
- Cálculo del balance hídrico diario a partir de los datos de precipitación, evapotranspiración real, y caudales.
- 15. Cálculo del Índice de Sequía:**

- Utilización del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para calcular el índice de sequía.

16. Extensión de Datos para Períodos Futuros:

- Uso del software Hydroesta 2 para realizar la extensión de datos de precipitación, evapotranspiración, caudales, y SPI a períodos futuros.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Parámetros de la Cuenca

4.1.1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Mashcón y Chonta.

Mediante el uso de herramientas de **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, se procedió a delimitar la cuenca correspondiente a los ríos **Mashcón** y **Chonta**, hasta la ubicación de la **captación Jesús Túnel**.

Figura. 45: Vista satelital de las cuencas del Mashcón (morada) y Chonta (Roja)

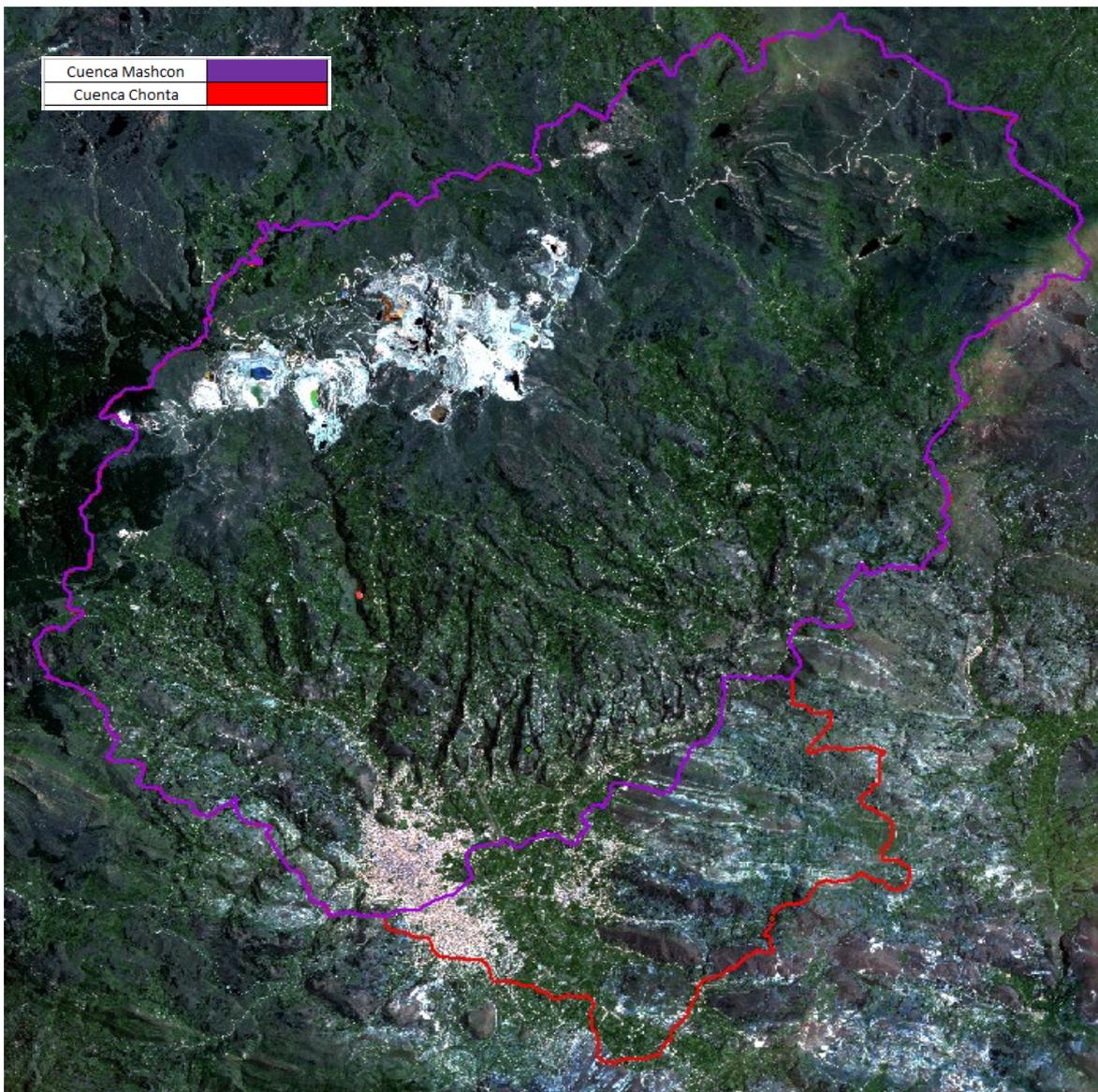
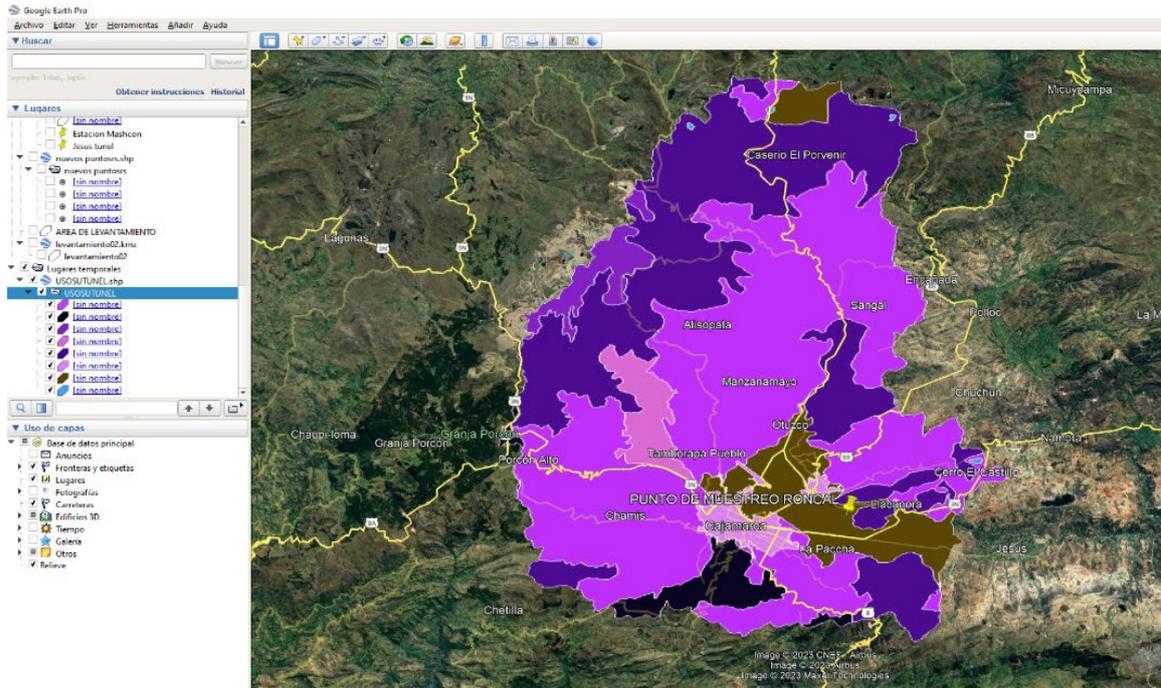


Figura. 46: Cuenca del río Mashcón y Chonta.



Los parámetros morfométricos de la cuenca de estudio se muestran en la Tabla 17; además, en la Figura 46 se presentan los gráficos de la curva hipsométrica y el histograma de frecuencias de altitudes respectivamente.

Tabla 17: *Parámetros morfométricos de la cuenca del río Mashcón y Chonta.*

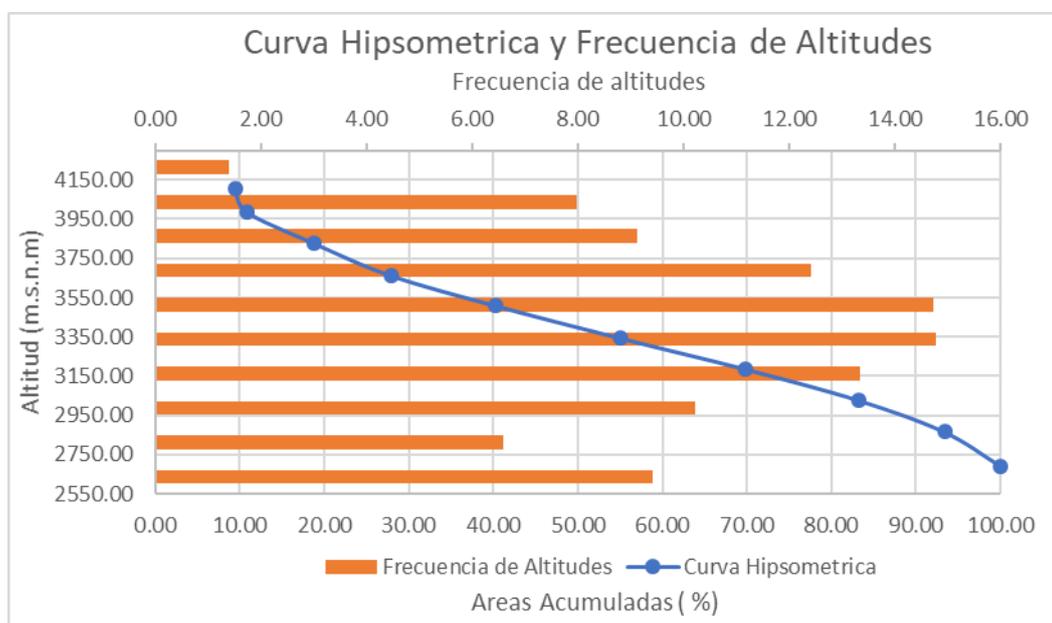
	Parámetro	Unidad	Valor	
	Área de la cuenca	km ²	664.031376	
	Perímetro	km	134.939496	
	Tiempo de concentración (T _c)	min	230.11	
	Coefficiente de compacidad (Gravelius)		1.62	
	Factor de forma		0.39	
	Rectángulo equivalente	Lado mayor	km	40.74
		Lado menor	km	6.68
	Longitud del máximo recorrido	km	32.24	
	Ancho de cueca	km	5.38	
Parámetros de forma	Factor de forma		0.39	
	Relación de elongación		0.71	
	Relación de confluencias		3.125	
	Relación de circularidad o relación de gravelius		0.51	
	Densidad de drenaje		0.00199	
	Densidad de corriente		0.09	

	Parámetro	Unidad	Valor
Parámetros de relieve	Cota máxima	msnm	4232
	Cota mínima	msnm	2617
	Altitud media	msnm	3419.66
	Altitud más frecuente	msnm	3343.04
	Pendiente de la cuenca	%	15.1
	Pendiente del cauce principal	%	1.35

4.1.2. Análisis de Resultados.

Los datos presentados sobre la cuenca son clave para entender su geografía e hidrología. Con un área de 664.03 km² y un perímetro de 134.94 km, la cuenca tiene una forma irregular. El coeficiente de compacidad de Gravelius es 1.62 y el factor de forma es 0.39, lo que indica una cuenca alargada y de forma no regular. Las dimensiones del rectángulo equivalente (con un lado mayor de 40.74 km y un lado menor de 6.68 km) resaltan esta irregularidad. La cuenca también tiene una gran variación altitudinal, desde 2617 msnm hasta 4232 msnm, y muestra pendientes significativas, con un promedio de 15.1% en la cuenca y 1.35% en el cauce principal. Estos datos son esenciales para la gestión de recursos hídricos, la predicción de inundaciones, y otros estudios relacionados con el ciclo del agua en esta área.

Figura. 47: Curva hipsométrica y frecuencia de Altitudes



Datos de la Cuenca del río Mashcón y Chonta.

4.2. Datos Hidrológicos y análisis usando el producto grillado PISCO:

Los datos obtenidos del producto grillado PISCO mediante el lenguaje de programación R, son los siguientes:

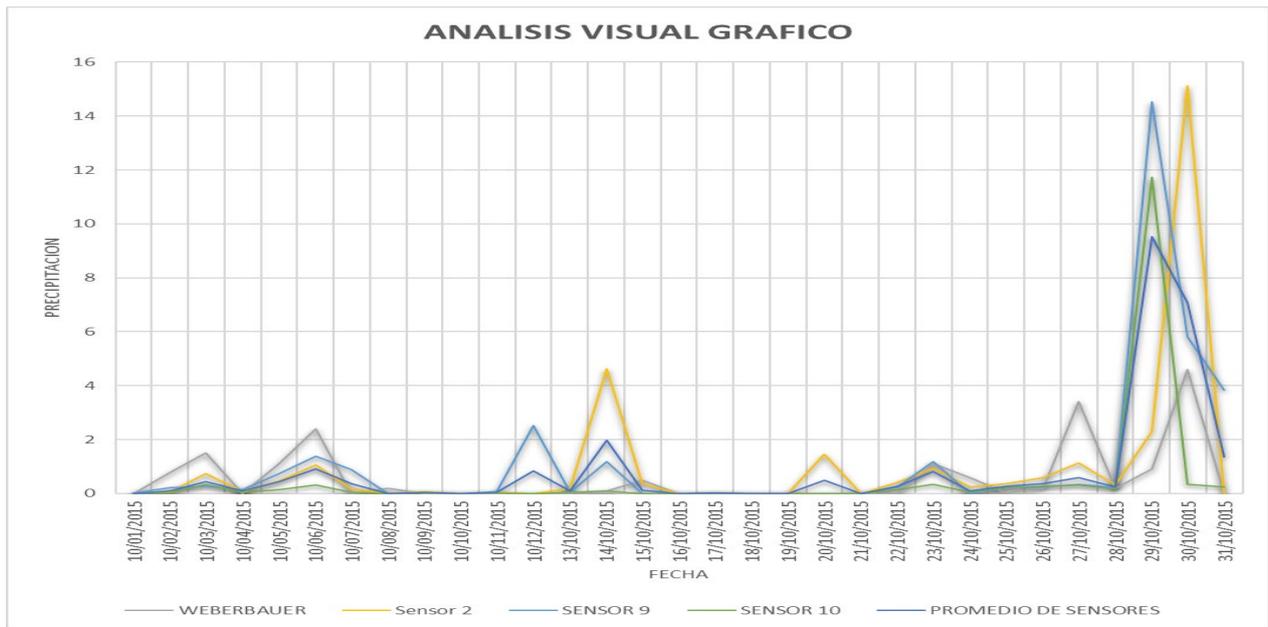
Figura. 48: Datos de precipitación de los 14 sensores que influyen en la cuenca.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	
1															
2	X7671.5	0.00733025	0.00327675	0.00245011	0.01360442	0.00740851	0.01235557	0.01736324	0.02439802	0.01154398	0.00309707	0.00714528	0.00291461	0.00361649	0.00082256
3	X7672.5	0.66954404	0.24327064	0.30363062	0.67315274	1.30420899	1.72379732	1.09590077	1.00204909	0.3890551	0.14436729	0.27809107	0.12857495	0.16861288	1.81153893
4	X7673.5	1.5845145	1.30166292	5.97128201	1.08180785	3.04820323	2.56609821	1.22123671	0.79968196	0	0.66838497	2.15155339	0	0.69337124	4.95011282
5	X7674.5	0.05239224	0.02193524	0.01547434	0.14191999	0.08397241	0.27107364	0.32280871	0.43120456	0.1186717	0.01294296	0.02844124	0.01811705	0.01390145	0.00986881
6	X7675.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18450698	0
7	X7676.5	0.70250738	0.15238525	0.06650959	7.93008852	5.6829834	12.4190979	24.1887074	11.923564	2.2829833	0.11523472	0.1492874	0.07426442	0.009196325	2.70219564
8	X7677.5	3.96883512	1.311128943	3.25342607	2.28161216	6.46090221	4.91151714	2.04775357	1.43744993	0.74654555	0.60824281	1.15153921	0.265789	0.31441543	13.8194895
9	X7678.5	15.5700245	4.4004693	11.0867872	6.66528988	2.50833893	1.4736768	7.61422396	11.7858028	7.53008366	4.64407539	18.1859283	1.33075452	5.39784718	24.075388
10	X7679.5	22.6939163	16.5909863	3.34739637	2.89680934	12.0842056	2.18493748	1.60266399	1.90235496	0.94095069	1.71955764	2.03600001	1.91164875	3.20145345	15.9674997
11	X7680.5	10.0897255	16.1292191	12.7116175	9.07949638	15.7980289	10.304863	0.93466437	0	1.08974791	24.0564346	6.48090458	1.35459852	0.39495522	10.3103132
12	X7681.5	1.82219207	2.76914096	1.90051603	2.98727274	3.82649732	1.24782121	0.65309012	1.42807829	3.31495905	0.17774001	1.03469539	4.27337646	0.40530214	8.11963463
13	X7682.5	4.02286005	3.14077353	0.33422425	2.67609334	3.46529579	3.00860333	1.81310105	1.57341111	1.74740279	4.99789524	0.94468105	0.51254803	0	3.66534162
14	X7683.5	4.01349449	5.07106352	2.20557046	6.9898901	6.16934729	6.91498852	5.14331245	6.04608345	10.1827402	5.01054382	8.28490543	13.6287909	15.6564407	3.59317374
15	X7684.5	0	0	0.01625042	0	0	0	0	0	0	0.12407061	0.1133959	0	0	0.04765733
16	X7685.5	0.00785084	0.98780918	0.38975117	0.18270445	0	0	0	0	0.57951629	0	0	1.75794101	0.36940444	0
17	X7686.5	0.00803967	0.00239018	0.00120086	0.00875831	0.00733289	0.01528627	0.01347631	0.01186923	0.00485838	0.00152353	0.00240116	0.00096255	0.00083035	0.00127544
18	X7687.5	2.49211287	3.7871964	0.23061578	2.22037339	1.39272392	0	0.30735382	0	0.39288169	4.70482635	1.7481786	0	0	0.09773795
19	X7688.5	3.91566491	8.45763779	16.8233318	9.98058033	11.5283785	3.366642	2.15537405	6.56212664	8.48467636	2.05917692	4.01809359	17.5153275	6.98195648	16.2749329
20	X7689.5	0.75933951	3.20106483	2.86438727	8.8137064	9.93568897	6.60771704	6.32978058	6.37233162	10.9033546	5.28993702	8.1772995	12.5400438	16.5155869	6.76464558
21	X7690.5	0.84752935	0.30296463	2.43620324	0.95394289	1.56476951	1.44392884	0.54779792	0.28679606	2.013906	1.06516981	5.93115807	8.61573029	16.8787804	4.92321396
22	X7691.5	1.66409385	1.59374559	3.68932796	2.32369065	3.16686559	2.6643784	1.70707202	1.61616087	1.57748115	0.73188424	1.79766381	2.30796051	3.46890879	5.61448956
23	X7692.5	0.2332772	0.03110286	0.00721254	0.09719678	0.5058465	0.36615035	0.11536236	0.05384643	0.02006971	0.02304344	0.03230489	0.00379121	0.00541751	0.68728411
24	X7693.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	X7694.5	0.6177302	0.08714928	0.08294556	0.48151302	1.5286864	1.0717268	0.41740909	0.34698591	0.32387674	0.05136899	0.30229169	1.10400677	1.88746381	2.32540011
26	X7695.5	0.00639336	0.0042677	0.00329495	0.0097801	0.00670151	0.00881732	0.00974156	0.01194072	0.00945455	0.00407959	0.0068773	0.00382638	0.00474497	0.00164896

Se obtuvieron 13150 datos por sensor para los 14 sensores se tiene un total de 184100 datos.

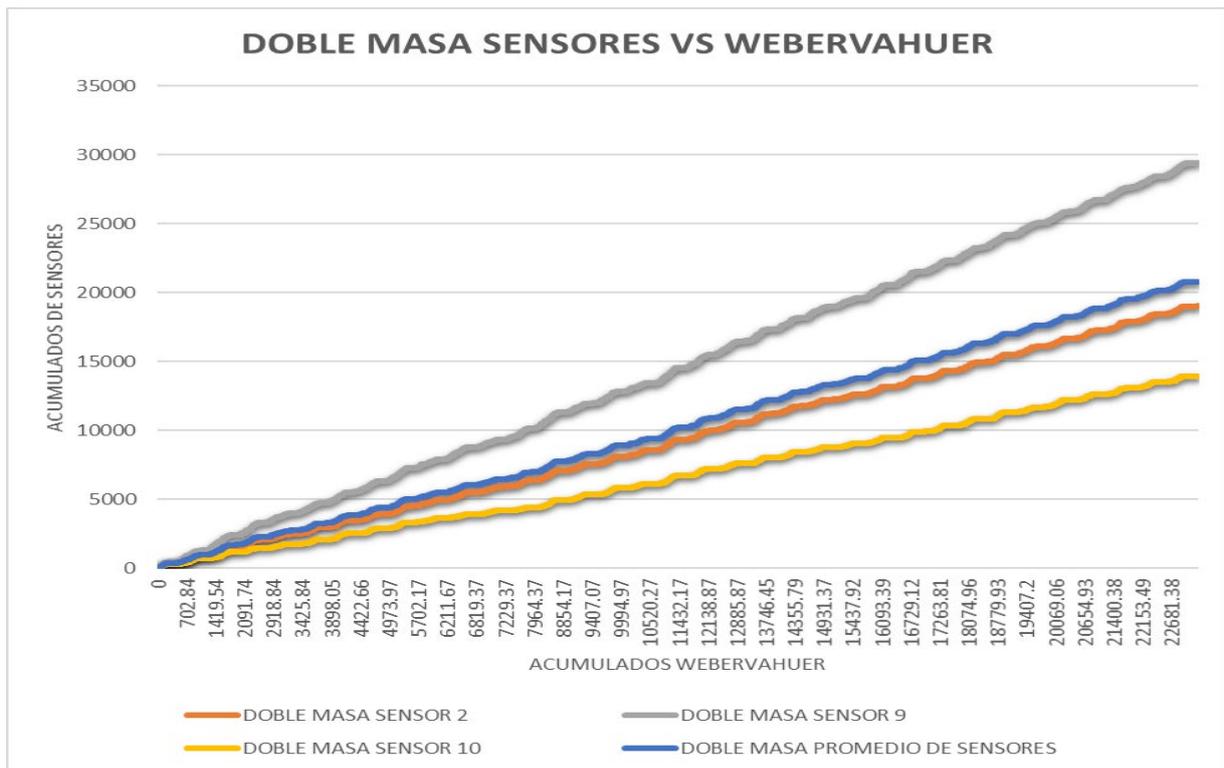
Aunque la documentación del producto grillado PISCO nos menciona su veracidad, se realizó una verificación de los sensores más cercanos, comparándolos con la estación Augusto Weberbauer obteniendo los siguientes resultados:

Figura. 49: Análisis Visual Grafico de los sensores.



En el análisis visual gráfico, se observa que tienen la misma tendencia, en los sensores más cercanos, pero el que más se aproxima a la estación weberbahuer es el promedio de todos los sensores, luego el análisis visual grafico obtenido es:

Figura. 50: Análisis de Doble masa de los sensores.



Con este análisis se confirma la veracidad de los sensores, al ser líneas prácticamente rectas y muy similares entre ellas.

4.3. Generación de caudales usando el Modelo Swat:

Antes de proceder a calcular los caudales, se procedió a con el cálculo de los HRU mediante el modelo SWAT, los cuales nos arrojan como resultados lo siguiente:

Figura. 51: Resultados HRU obtenidos por SWAT.

```
SWAT model simulation Date: 9/8/2023 12:00:00 AM Time: 00:00:00
MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION THRESHOLDS : 0 / 0 / 0 [%]
Number of HRUs: 605
Number of Subbasins: 31
```

		Area [ha]	Area[acres]		
Watershed		77012.5469	190301.8540		
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	
LANDUSE:					
	Water --> WATR	4085.0313	10094.3165	5.30	
	Agricultural Land-Generic --> AGRL	34758.7813	85890.6864	45.13	
	Wetlands-Forested --> WETF	990.4688	2447.4978	1.29	
	Range-Grasses --> RNGE	19826.0000	48991.0373	25.74	
	Orchard --> ORCD	16268.4063	40200.0453	21.12	
	Wetlands-Mixed --> WETL	117.2969	289.8464	0.15	
	Forest-Deciduous --> FRSD	966.5625	2388.4243	1.26	
SOILS:					
	H16-3b-5504	42782.0469	105716.5769	55.55	
	I-Kh-J-c-5531	11928.3906	29475.6497	15.49	
	I-H1-c-5528	12571.0938	31063.8012	16.32	
	I-H1-K1-b-5527	9731.0156	24045.8262	12.64	
SLOPE:					
	50-75	6101.2656	15076.5324	7.92	
	25-50	26593.0313	65712.7099	34.53	
	12.5-25	24658.8750	60933.3131	32.02	
	0-12.5	18008.5000	44499.9039	23.38	
	75-9999	1650.8750	4079.3947	2.14	
		Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area
SUBBASIN #	1	2068.2656	5110.7878	2.69	

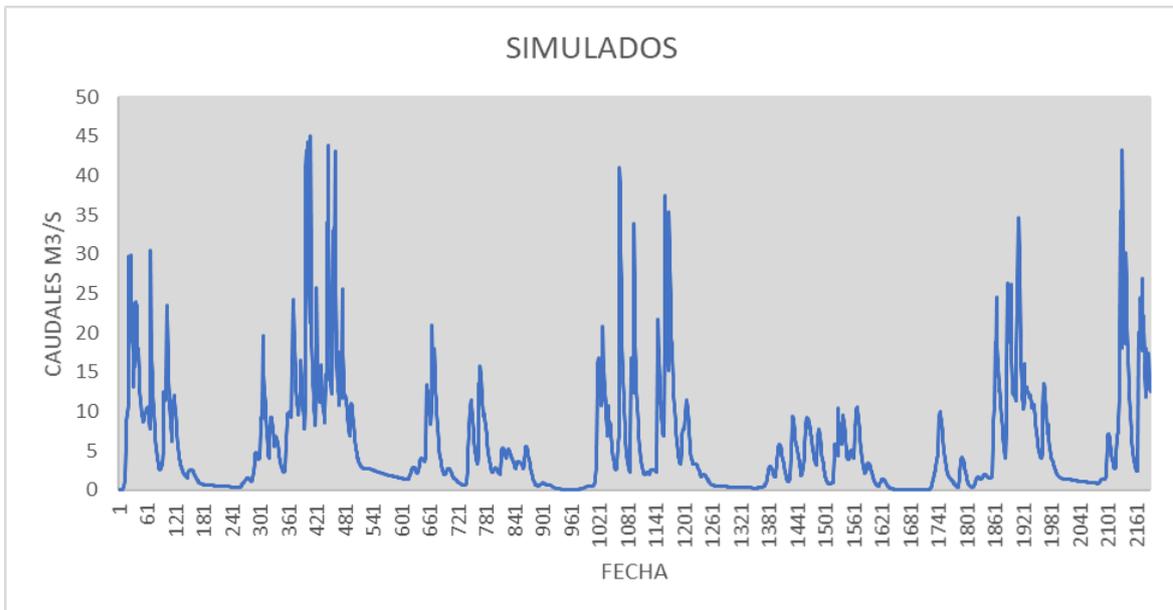
Observamos los datos de la cuenca total, así como cobertura vegetal, uso de suelos, y pendiente, (estos datos SWAT los calcula para cada subcuenca)

Los resultados obtenidos por el modelo SWAT sin calibrar son los siguientes:

Figura. 52: Datos obtenidos con SWAT en ACCESS.

rch		rch															
sub	SUB	YEAR	MON	AREAKm2	FLOW_INkms	FLOW_OUTk	EVAPcms	TLOSScms	SED_INtms	SED_OUTtor	SEDCONCmg	ORGN_INkg	ORGN_OUTk	ORGP_INkg	ORGP_OUTk	NO3_INkg	NO3_OUTkg
tblDepDef	1	1981	1	20.68	0.01585	0.01547	0.0003355	0	46.04	43.07	699.8	68.24	66.93	19.09	18.58	91.14	88.85
tblHuDef	2	1981	1	23.41	0.01842	0.01785	0.0005032	0	4.642E-07	0	0	0.00007221	0.00003847	0.0002166	0.0001698	22.39	21.7
tblMgtDef	3	1981	1	39.17	0.04076	0.03844	0.002089	0	1897	1754	3036	2218	2169	617.6	597.4	151.7	141.1
tblPotDef	4	1981	1	28.55	0.04061	0.03987	0.0006476	0	1411	1372	2434	1663	1652	462.6	458.1	168.1	164.8
tblRchDef	5	1981	1	76.55	0.106	0.1041	0.001479	0	3126	15.93	37.84	3821	3775	1056	1037	411.6	404.3
tblRinDef	6	1981	1	54.24	0.08307	0.08069	0.00188	0	7.414E-07	0	0	0.0001617	0.00003395	0.0004852	0.0003461	390.7	379.6
tblRinDef	7	1981	1	131.2	0.1849	0.1847	0.0008164	0	15.93	15.85	22.07	3775	3772	1037	1036	784.2	783.7
tblSedDef	8	1981	1	114.4	0.1256	0.1175	0.006689	0	43.07	15.17	35.92	66.93	60.14	18.58	15.9	278.8	260.7
tblSndDef	9	1981	1	247.4	0.3079	0.306	0.001195	0	31.02	24.74	22.87	3832	3789	1052	1034	1061	1055
tblSndDef	10	1981	1	28.24	0.04142	0.04101	0.0003085	0	2.778E-07	0	0	0.00008715	0.00002605	0.0002615	0.000178	147.3	145.9
tblSndDef	11	1981	1	47.22	0.3163	0.3148	0.001186	0	116800	114100	29180	128900	128300	40870	40550	646.4	591.8
tblSubDef	12	1981	1	19.74	0.02462	0.02447	0.0001292	0	3594	3554	6452	2972	2964	914.8	911.4	179	177.5
tblSwDef	13	1981	1	74	0.3455	0.3439	0.001279	0	117700	118.1	57.92	131300	130500	41460	41100	818.7	775.3
tblVeDef	14	1981	1	74.21	0.1507	0.1444	0.005217	0	23990	21640	14370	26530	25680	8211	7829	712.7	647.2
tblVqDef	15	1981	1	16.84	0.03006	0.02985	0.0001602	0	3.088E-07	0	0	0.00005182	0.000008796	0.0001555	0.0001392	253.2	251.6
tblVqDef	16	1981	1	176.8	0.5268	0.5255	0.0009368	0	120.6	110.5	45.63	153600	153100	47720	47460	1894	1886
tblVrDef	17	1981	1	159.4	0.5018	0.4968	0.003691	0	21760	110.1	46.03	156200	153600	48930	47710	1515	1442
	18	1981	1	254.1	0.593	0.5898	0.002377	0	1699	102.5	40.55	154700	153100	47920	47240	2162	2142
	19	1981	1	15.3	0.01053	0.01038	0.000131	0	1.533E-07	0	0	0.00004659	0.00003439	0.0001398	0.0001244	73.52	72.6
	20	1981	1	58.01	0.05653	0.05373	0.002481	0	1807	1588	3887	1701	1611	497.5	461.8	405.8	385.2

Figura. 53: Grafico de Datos obtenidos 1988 a 1993.

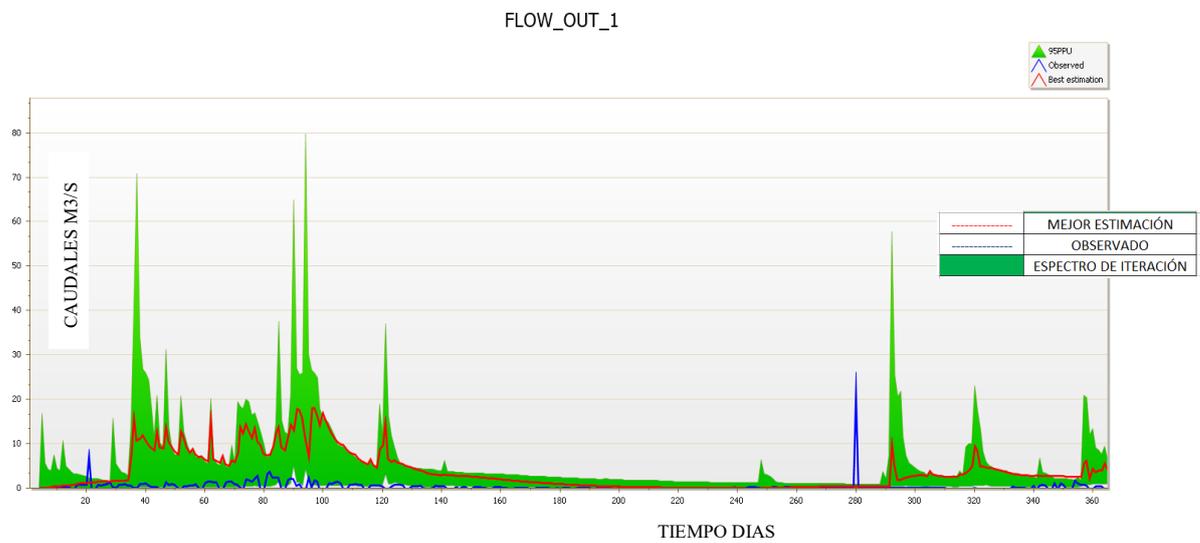


Se muestra el período de análisis de 1988 hasta 1993, en el anexo 3 se muestra la data completa, como se observa, se ve que se calcularon 13500 datos aproximadamente, que son la misma cantidad de datos ingresados.

4.3.1. Calibración y Validación del Modelo.

El proceso de Calibración, se realizó usando los datos observados de la estación Mashcón en el período del año 1988 hasta el 1993.

Figura. 54: Calibración usando la estación Mashcón caudales vs datos enumerados.



Acá podemos observar el espectro llamado 95PPU, que es las iteraciones que hace el programa para alcanzar la convergencia con los datos observados

Tabla 18: Parámetros Calibrados:

Goal_type= R2	No_sims= 500	Best_sim_no= 111	Best_goal = 2.080450e-002		
Parameter_Name		Fitted_Value	Min_value	Max_value	
1:V__ALPHA_BF.gw		0.1189	0.01	1	
2:V__GW_DELAY.gw		495.000092	0.01	500	
3:V__GW_REVAP.gw		0.1082	0.02	0.2	
4:V__GWQMN.gw		1550.006958	0.01	5000	
5:V__REVAPMN.gw		155.006897	0.01	500	
6:V__ESCO.hru		0.8119	0.01	1	
7:V__EPCO.hru		0.5743	0.01	1	
8:V__CANMX.hru		5.0095	0.01	100	
9:V__TIMP.bsn		0.0397	0.01	1	
10:V__SMFMX.bsn		2.5075	0.01	10	
11:V__SMFMN.bsn		4.9051	0.01	10	
12:V__SFTMP.bsn		1.6567	0.01	5	
13:V__SMTMP.bsn		4.7505	0.01	5	
14:V__SURLAG.bsn		20.09	1	24	
15:V__CH_K2.rte		117.505302	0.01	250	
16:V__CH_N2.rte		0.1977	-0.01	0.3	
17:R__CN2.mgt		0.294	-0.3	0.3	
18:V__TLAPS.sub		-7	-10	10	
19:V__SHALLST.gw		110.008896	0.01	1000	
20:V__DEEPST.gw		3350.003418	0.01	5000	
21:V__RCHRG_DP.gw		0.5149	0.01	1	
22:V__GWHT.gw		18.252701	0.01	25	
23:V__GW_SPYLD.gw		0.2713	0.01	0.4	
24:V__BIOMIX.mgt		0.8119	0.01	1	

Se observa que, con 500 iteraciones, la mejor solución se la encuentra en la iteración número 111, estos parámetros son ingresados al modelo y se actualizan los datos para el proceso de validación.

Para la Validación , se usaron datos de la estación Jesús Túnel, desde 1988 hasta el 1993:

Figura. 55: Validación usando la estación Jesús Túnel caudales vs datos enumerados.

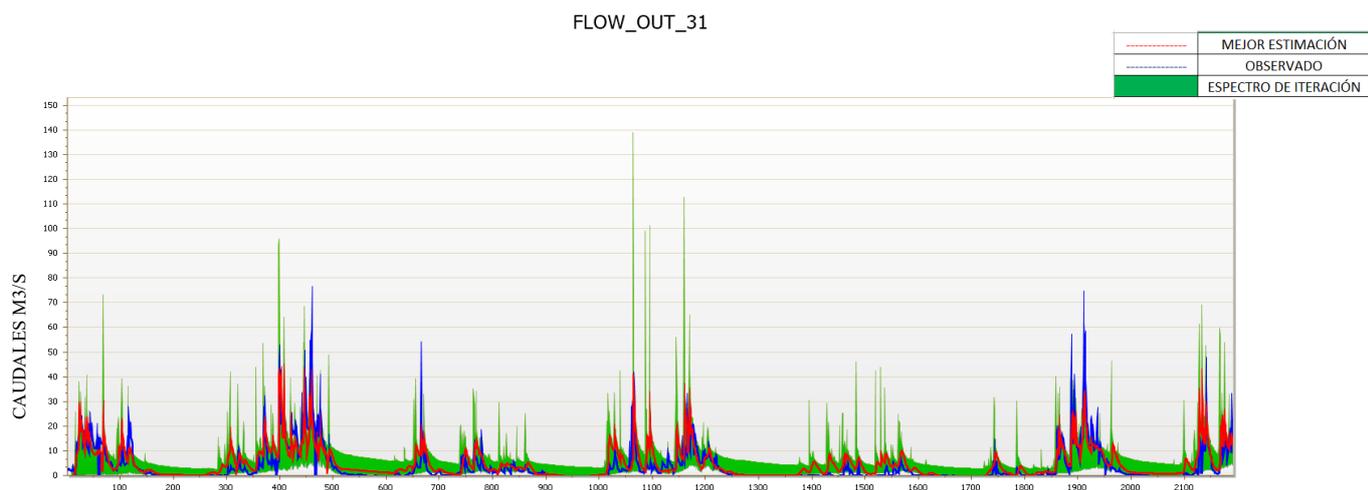


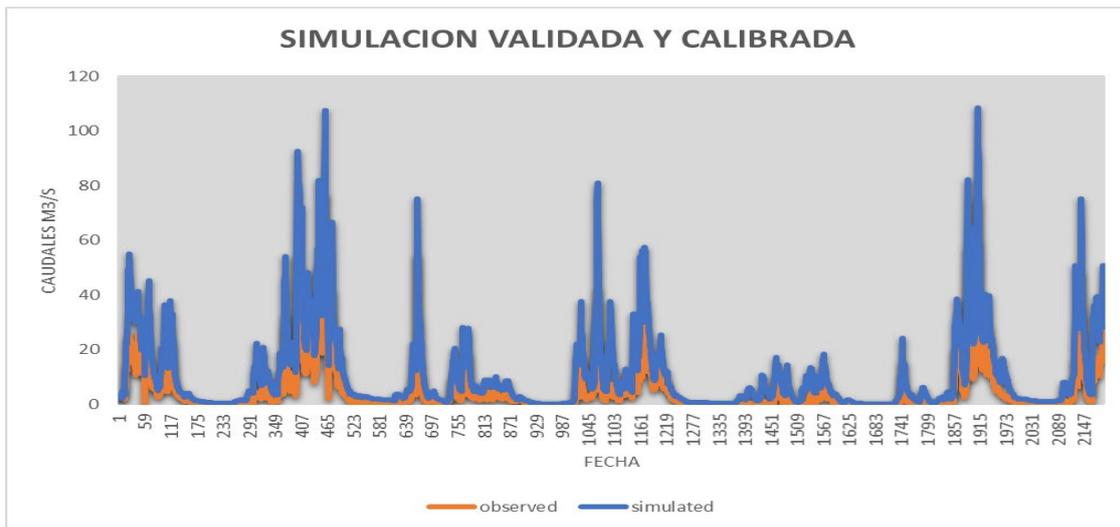
Tabla 19: Parámetros Validados:

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
V__ALPHA_BF.gw	0.55153	0.01	1
2:V__GW_DELAY.gw	36.50927	0.01	500
3:V__GW_REVAP.gw	0.1595	0.02	0.2
4:V__GWQMN.gw	3185.003662	0.01	5000
5:V__REVAPMN.gw	408.501831	0.01	500
6:V__ESCO.hru	0.08227	0.01	1
7:V__EPCO.hru	0.62281	0.01	1
8:V__CANMX.hru	3.10969	0.01	100
9:V__TIMP.bsn	0.76537	0.01	1
10:V__SMFMX.bsn	9.470531	0.01	10
11:V__SMFMN.bsn	0.03997	0.01	10
12:V__SFTMP.bsn	3.48803	0.01	5
13:V__SMTMP.bsn	4.05689	0.01	5
14:V__SURLAG.bsn	12.109	1	24
15:V__CH_K2.rte	185.252594	0.01	250
16:V__CH_N2.rte	0.13167	-0.01	0.3
17:R__CN2.mgt	0.2646	-0.3	0.3
18:V__TLAPS.sub	-3.5	-10	10
19:V__SHALLST.gw	977.000244	0.01	1000
20:V__DEEPST.gw	4105.001953	0.01	5000
21:V__RCHRG_DP.gw	0.97327	0.01	1
22:V__GWHT.gw	18.02779	0.01	25
23:V__GW_SPYLD.gw	0.01741	0.01	0.4
24:V__BIOMIX.mgt	0.42085	0.01	1

Observamos que luego del proceso de validación, usando 500 iteraciones siendo la más aproximada y mejor la iteración número 289, obtenemos datos extremadamente aproximados, siendo una obtención de caudales muy óptima para el estudio.

El grafico de los caudales calibrados y validados son:

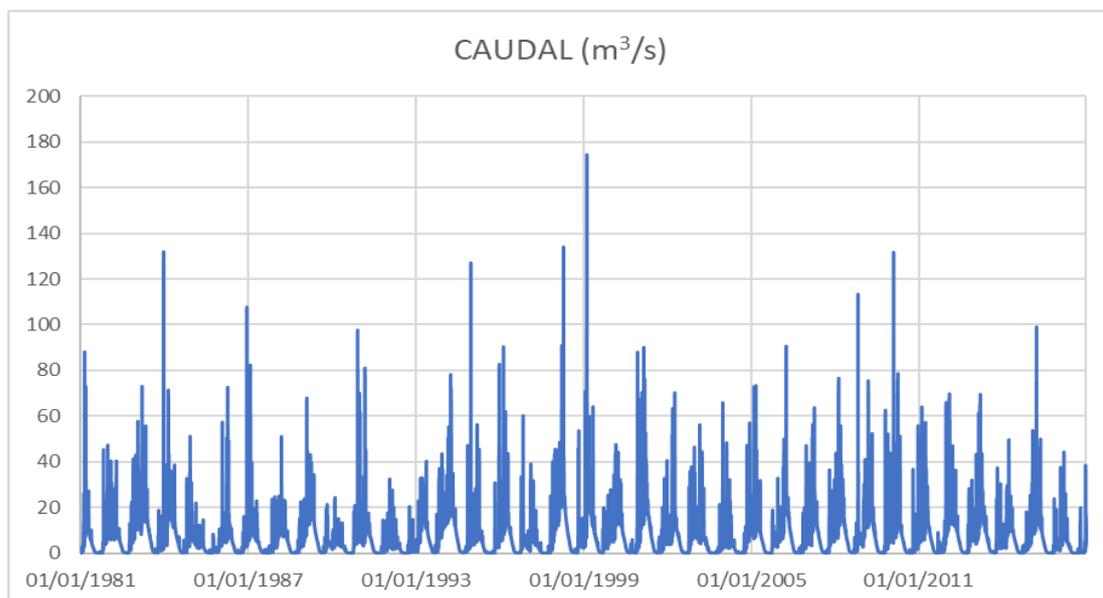
Figura. 56: Caudales Obtenidos mediante el modelo SWAT



4.3.2. Caudales diarios generados por el modelo SWAT.

La data final generada luego del proceso de calibración y validación consta de 13500 datos diarios desde 1 de enero del 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016.

Figura. 57: Data total de caudales diarios obtenida mediante el Modelo SWAT



El modelo SWAT nos dio resultados en cm^3/s , donde el caudal mayor es de 174.4 m^3/s , el cual se produjo el 13 de febrero de 1999.

4.3.3. Análisis de resultados.

Se observa una variabilidad en los caudales a lo largo de los años.

- Los caudales más altos parecen estar concentrados en los años 1998, 1994 y 2001.
- El año 1992 tiene el caudal más bajo registrado.
- La mayoría de los caudales se encuentran en el rango de 0.4 a 0.8.
- Hay algunos valores atípicos más altos alrededor de 1.0.
- Variabilidad Temporal: Los caudales varían significativamente a lo largo de los años.
- Caudales Extremos: Se identifica un año (1998) con el caudal máximo, que podría indicar eventos extremos o condiciones especiales en ese año.
- El año 1992 tiene el caudal mínimo, lo que podría deberse a condiciones hidrológicas inusuales.

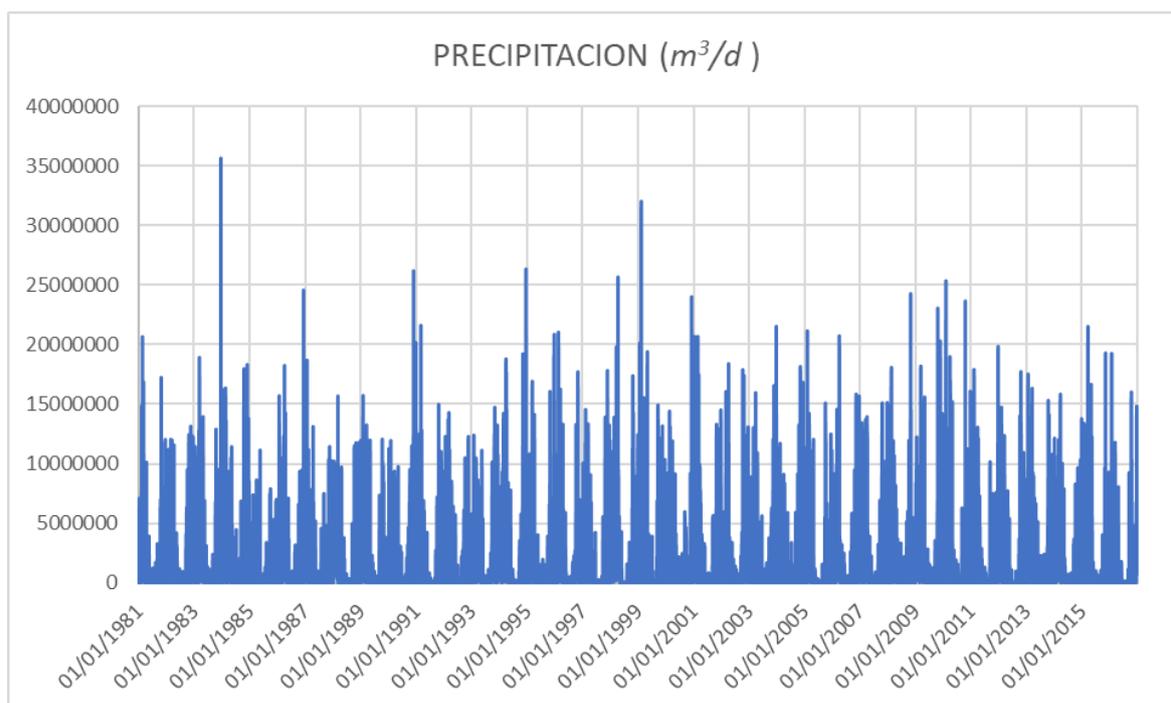
4.4. Balance Hídrico:

Para obtener el balance hídrico se cuenta con los datos de precipitación, evapotranspiración real y Caudales, todos en m^3/d

- *Precipitación:*

El Histograma de los datos de precipitación máxima diaria, promedio de todos los sensores transformados en m^3/d se muestran en el siguiente gráfico:

Figura. 58: Histograma de precipitación diaria en m³/s



- *Coficiente de Cultivo Kc:*

El Kc se calcula con los datos de suelo proporcionado por la FAO, usando la tabla N°

06

Tabla 20: Coeficiente de Cultivo Ponderado Kc:

Clasificación	Cobertura Vegetal FAO	AREA	AREA %	CODIGO DE SUELO FAO	TIPO DE CULTIVO	KC PONDERADO POR AÑO	KC PROMEDIO
1	Agricultura costera y andina	347972635.3	0.451244935	WATR	no aplicable	1	0.451244935
2	Area urbana	16917808.09	0.021938723	WATR	no aplicable	1	0.021938723
3	Bofedal	9906654.092	0.012846779	FRSD	valores de uso para Robles	0.75	0.009635084
4	Bosque xérico interandino	9679385.024	0.01255206	AGRL	valores de uso para el Sorgo de Granos	0.87	0.010920292
5	Centro minero	23149871.53	0.030020356	WETF	valores de uso para Robles	0.75	0.022515267
6	Lagunas, lagos y cochas	716113.978	0.000928644	ORCD	valores de uso para Manzanos	1.15	0.001067941
7	Matorral arbustivo	162960894.8	0.211324889	RNGE	valores de uso para Pequeña Bluestem (LAI _{max} =2.5)	0.65	0.137361178

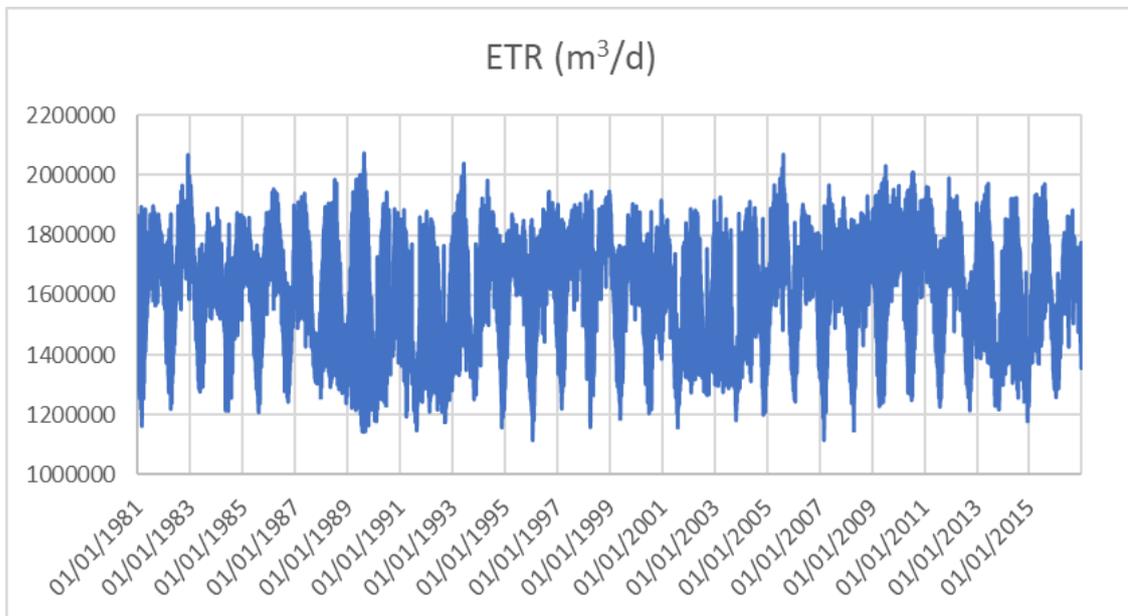
8	Pajonal andino	198609378.4	0.25755323	WETL	valores de uso para Pasto Alamo	0.6	0.154531938
9	Plantación Forestal	1226408.065	0.001590385	FRSE	valores de uso para Pinos	0.5	0.000795192
	Promedio	771139149.3	1				0.81001055

El Kc ponderado obtenido mediante la metodología de Thiessen para toda la cuenca es **0.81**.

- *Evapotranspiración real:*

La base de datos PISCO nos proporciona datos de Evapotranspiración Potencial, para transformarlos en Evapotranspiración Real, se tiene que usar la formula N° 12, quedando el Histograma de Evapotranspiración real para la data total de la siguiente manera:

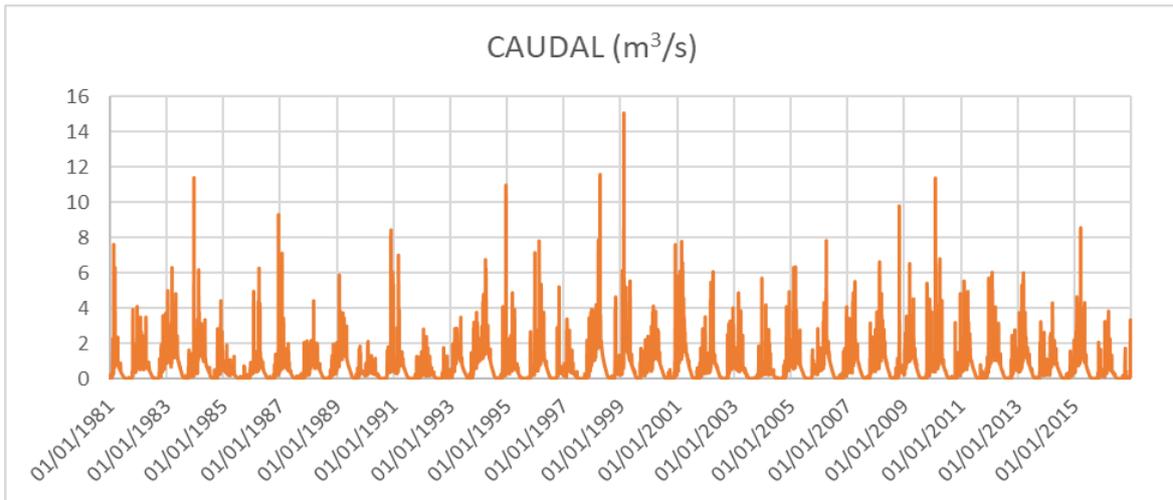
Figura. 59: Histograma de Evapotranspiración Real en m³/s



- *Caudales:*

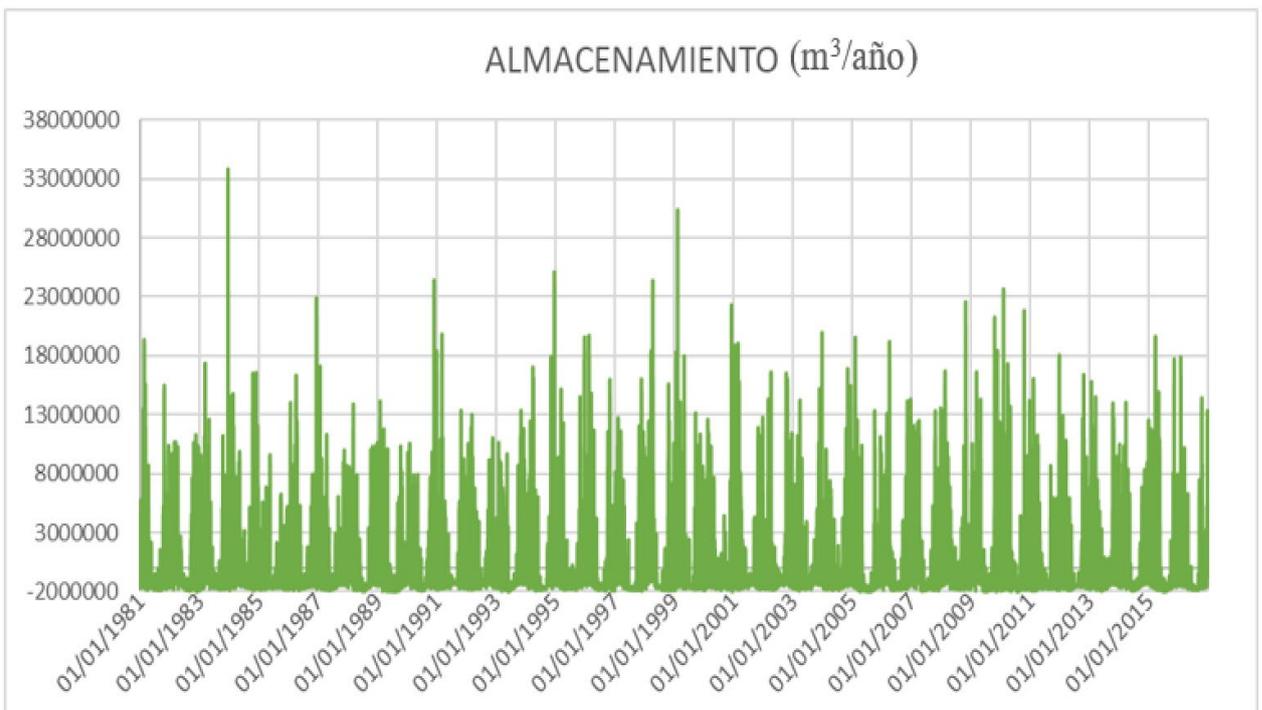
Los datos de caudales en m³/s calculados y transformados se muestra en el siguiente histograma.

Figura. 60: Histograma de Caudales en m^3/s



Teniendo todo este conjunto de datos (Precipitación, Evapotranspiración Real y Caudales en m^3/s) podemos calcular el balance Hídrico usando la ecuación 11, el histograma diario de este cálculo se muestra en el siguiente gráfico:

Figura. 61: Variación del Almacenamiento ΔS .

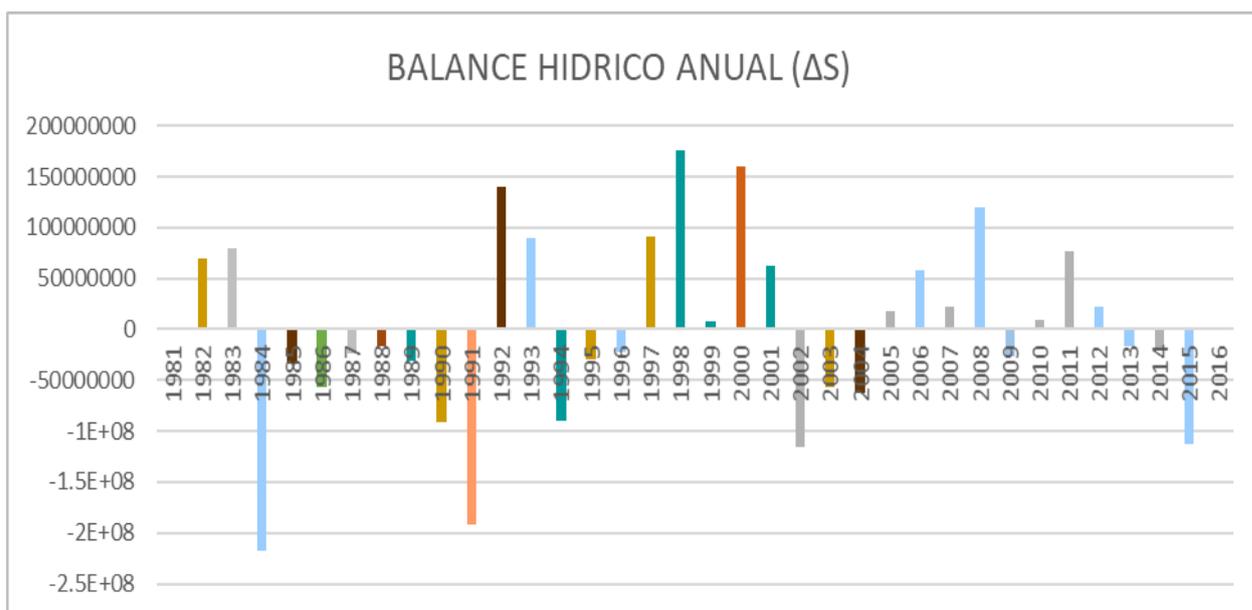


Calculando la sumatoria anual del balance hídrico se tiene:

Tabla 21: Balance Hídrico Anual MMC:

Año	ALMACENAMIENTO (MMC)
1981	36435567.4
1982	352613.774
1983	70226193.2
1984	79106697.5
1985	-217113532
1986	-33530690.7
1987	-56978097.1
1988	-24329853.8
1989	-16366945.3
1990	-31541323.2
1991	-91828438
1992	-192446240
1993	140162745
1994	89300868.6
1995	-89600866.3
1996	-29366002.4
1997	-21713087.5
1998	91705861.7
1999	175871469
2000	7529719.2
2001	159484866
2002	63120142.8
2003	-115905230
2004	-56250848.7
2005	-62797808.3
2006	18558769.3
2007	58641760.8
2008	22838841.5
2009	120087661
2010	-26833496.1
2011	8934480.19
2012	76678929
2013	22405681.6
2014	-16885657.3
2015	-18855569.2
2016	-113206016

Figura. 62: Balance Hídrico Anual (VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO (ΔS)).



4.4.1. BALANCE SEGÚN LA METODOLOGÍA DEL ANA:

Para corroborar los análisis realizados, se hizo un balance según la metodología del ANA, utilizando los Kc dados por la FAO, así como también los usos de suelos, áreas, caudales y demás datos obtenidos a lo largo de esta investigación. (MMC)

Tabla 22: Áreas y Cultivos de la zona.

Clasificación	ÁREA M2	ÁREA HEC
Granos	9906654	10
Robles	32829257	33
Manzana	716114	1
Matorrales	162960895	163
Pastos	198609378	199
Pinos	1226408	1

Tabla 23: Asignación de Agua a Comités de la cuenca.

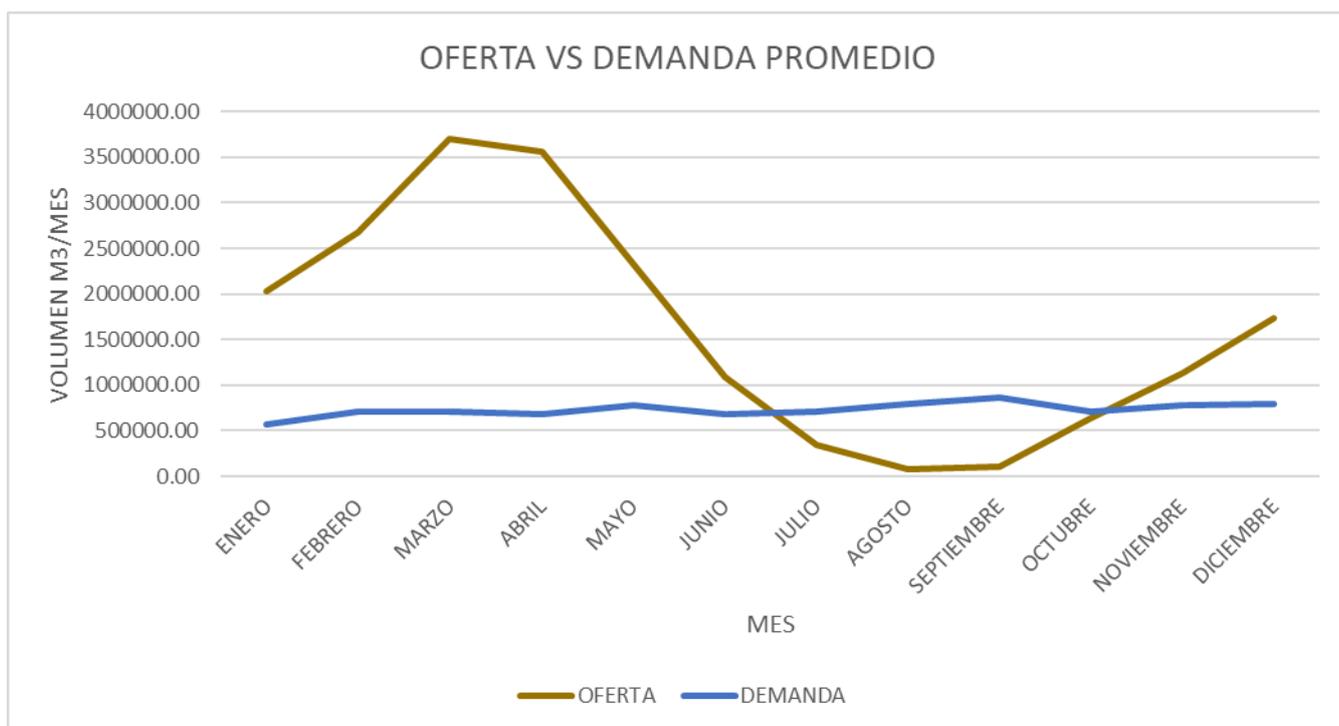
Fuente	Usuarios	Comité	Agua asignada	Por Fuente
Río Grande	JURMASH	ABUNMAYO	60	440
		LAS VIZCACHAS	20	
		LLUSHCAPAMPA	60	
		TRES MOLINOS	100	
Río Porcon	JURMASH	SEDACAJ	200	140
		COLGA LA RAMADA	20	
		HUAMBOCANCHA	20	
		SEDACAJ	100	
Río Mashcón: Río Grande + Río Porcon + Río Purhuay	JURMASH	EL INGENIO	100	260
		HUACARIA	100	
		COLPA	60	
		TOTAL	840	840
	JURMASH			540
	SEDACAJ			300

Tabla 24: Balance hídrico promedio total según metodología del ANA

CUADRO BALANCE HÍDRICO TOTAL												
DESCRIPCIÓN:	MESES											
OFERTA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Nº DÍAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
OFERTA TOTAL (L/S)	756.21	1106.37	1380.47	1372.70	870.72	419.79	128.37	27.13	42.49	237.35	434.92	645.76
OFERTA (M3/MES)	2025430.46	2676529.91	3697451.71	3558036.74	2332149.10	1088101.18	343820.43	72659.91	110137.93	635723.70	1127317.11	1729600.34
DEMANDA (M3/MES)	580202.82	697174.94	690043.85	672448.78	765355.33	687301.36	701339.01	796690.92	851892.90	695184.55	781020.78	793474.66
TOTAL OFERTA (M3/AÑO)	19396958.52											
TOTAL DEMANDA (M3/AÑO)	8712129.91											
TOTAL BALANCE HÍDRICO (M3/AÑO)	10684828.6											

Esta tabla nos muestra el proceso final del balance según la metodología brindada por el ANA, en el Anexo 5 se observa el proceso de cálculo para llegar a ello.

Figura. 63: Balance Hídrico promedio desde 1981 hasta 2026 según la metodología del ANA.



4.4.2. Análisis de resultados.

El análisis sobre el balance hídrico por año en metros cúbicos (m³):

Tendencias del Balance Hídrico: Hay una variabilidad significativa en el balance hídrico a lo largo de los años, Algunos años tienen un saldo positivo, indicando un excedente de agua, mientras que otros tienen un saldo negativo, indicando una deficiencia, Los Años Destacados: 1983, 1984, 1993, 1994, 1999, 2001 y 2002 tienen saldos positivos notables, lo que indica períodos con excedente de agua mientras que los años 1985, 1992, 1996, 1997, 2003, 2004, 2005, 2010, 2014 y 2015 tienen saldos negativos, indicando años con déficit de agua.

Año con el Mayor Excedente: El año 1999 tiene el mayor saldo positivo, indicando un considerable excedente de agua.

Año con el Mayor Déficit: El año 2016 tiene el mayor saldo negativo comparado con los demás períodos de déficit (1985,1992,2001), indicando el mayor déficit de agua en la serie temporal.

4.5. Índice de Sequía:

El cálculo del Índice de sequía, se basa en la metodología citada en el Capítulo III, primero que nada, se procede a calcular el Índice estandarizado de Precipitación, el cual se encuentra siguiendo un procedimiento estadístico que se trató en capítulos anteriores, el cálculo se realiza para 3, 6 y 12 meses, al tratarse de ajustes a distribuciones estadísticas, los valores del Índice estandarizado de Precipitación varían entre -2 y 2, una vez calculado este índice se encuentra la Condición de Sequía o Índice de Sequía según la tabla , a continuación se presentan los resultados obtenidos.

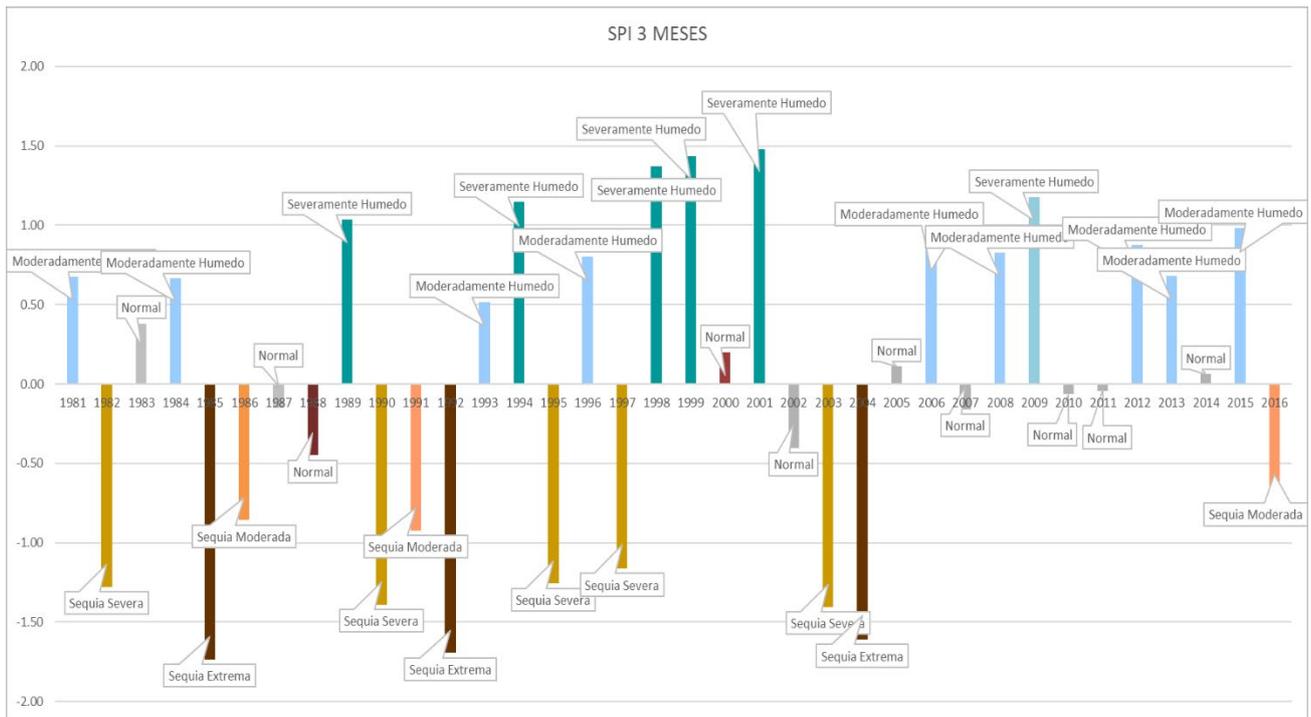
Tabla 25: Índice de sequía para los 3 primeros meses del año:

AÑO	PREC	LN PREC	Ajuste Gamma	SPI	CONDICIÓN
1981	12.86943733	2.55	0.72	0.68	Moderadamente Húmedo
1982	8.326047299	2.12	0.14	-1.28	Sequía Severa
1983	12.12018209	2.49	0.63	0.38	Normal
1984	12.84002297	2.55	0.72	0.66	Moderadamente Húmedo
1985	4.743482051	1.56	0.00	-1.73	Sequía Extrema
1986	9.433062893	2.24	0.26	-0.86	Sequía Moderada
1987	10.94790428	2.39	0.47	-0.15	Normal
1988	10.32526502	2.33	0.38	-0.45	Normal
1989	14.02588033	2.64	0.83	1.03	Severamente Húmedo
1990	7.946756131	2.07	0.10	-1.39	Sequía Severa
1991	9.282593468	2.23	0.24	-0.92	Sequía Moderada
1992	6.004876942	1.79	0.01	-1.69	Sequía Extrema
1993	12.45262298	2.52	0.67	0.52	Moderadamente Húmedo
1994	14.50232112	2.67	0.86	1.15	Severamente Húmedo
1995	8.390374448	2.13	0.14	-1.26	Sequía Severa
1996	13.24220173	2.58	0.76	0.80	Moderadamente Húmedo
1997	8.664595665	2.16	0.17	-1.16	Sequía Severa
1998	15.81753383	2.76	0.93	1.37	Severamente Húmedo

1999	16.36210959	2.79	0.95	1.44	Severamente Húmedo
2000	11.69993587	2.46	0.58	0.20	Normal
2001	16.84158326	2.82	0.96	1.48	Severamente Húmedo
2002	10.42235865	2.34	0.40	-0.40	Normal
2003	7.893463247	2.07	0.10	-1.40	Sequia Severa
2004	6.850575962	1.92	0.04	-1.61	Sequia Extrema
2005	11.50612748	2.44	0.55	0.11	Normal
2006	13.44202854	2.60	0.78	0.87	Moderadamente Húmedo
2007	10.9333657	2.39	0.47	-0.16	Normal
2008	13.30877378	2.59	0.76	0.83	Moderadamente Húmedo
2009	14.62648266	2.68	0.87	1.18	Severamente Húmedo
2010	11.1308631	2.41	0.50	-0.06	Normal
2011	11.18060625	2.41	0.51	-0.04	Normal
2012	13.46872311	2.60	0.78	0.88	Moderadamente Húmedo
2013	12.88624839	2.56	0.72	0.68	Moderadamente Húmedo
2014	11.40585829	2.43	0.54	0.06	Normal
2015	13.83316399	2.63	0.81	0.98	Moderadamente Húmedo
2016	9.746475903	2.28	0.30	-0.72	Sequia Moderada

Una vez calculado la condición se procede a graficar los resultados:

Figura. 64: Condición de Sequía para los 3 primeros meses desde 1981 hasta 2026.



Del mismo modo se hace el análisis para medio año y para el año completo, los resultados son:

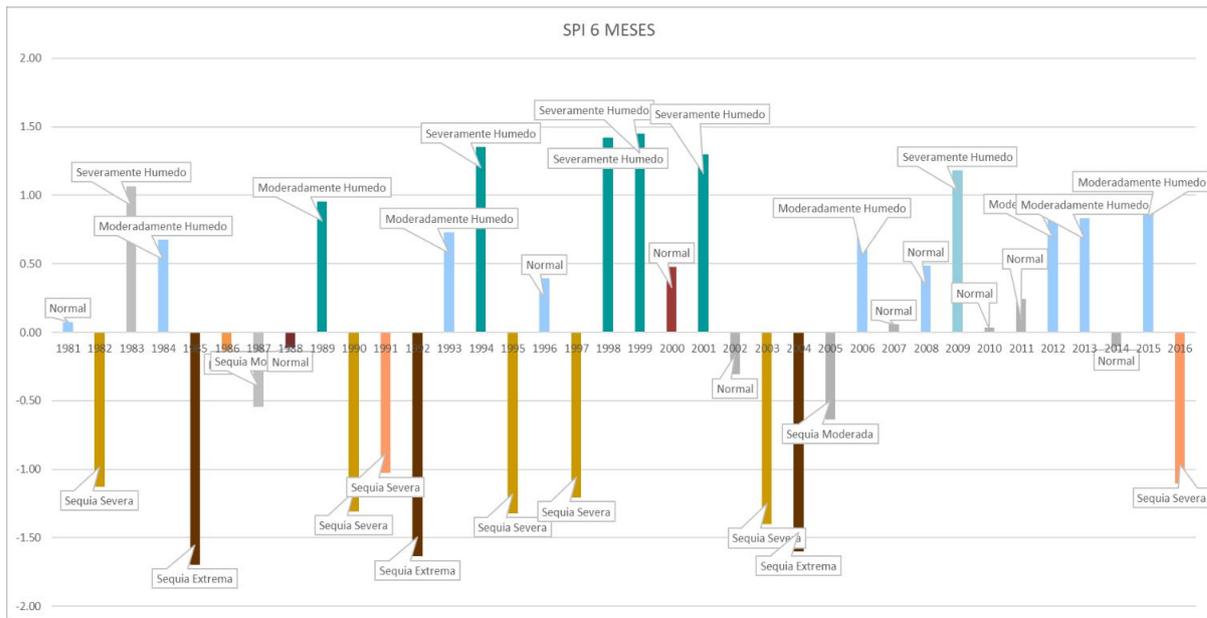
Tabla 26: Índice de sequía para los 6 primeros meses del año:

AÑO	PREC	LN PREC	Ajuste Gamma	SPI	CONDICIÓN
1981	15.64668208	2.75	0.54	0.07	Normal
1982	12.40616943	2.52	0.18	-1.13	Sequía Severa
1983	18.86826688	2.94	0.84	1.07	Severamente Húmedo
1984	17.35354616	2.85	0.72	0.67	Moderadamente Húmedo
1985	8.1788923	2.10	0.00	-1.70	Sequía Extrema
1986	15.12208676	2.72	0.48	-0.13	Normal
1987	14.08231121	2.64	0.35	-0.54	Sequía Moderada
1988	15.16873563	2.72	0.48	-0.11	Normal
1989	18.37469287	2.91	0.80	0.95	Moderadamente Húmedo
1990	11.73804221	2.46	0.12	-1.31	Sequía Severa
1991	12.73067163	2.54	0.21	-1.03	Sequía Severa

1992	9.549287795	2.26	0.02	-1.64	Sequía Extrema
1993	17.53522209	2.86	0.74	0.73	Moderadamente Húmedo
1994	20.6324726	3.03	0.92	1.35	Severamente Húmedo
1995	11.67055155	2.46	0.12	-1.32	Sequía Severa
1996	16.50175249	2.80	0.63	0.39	Normal
1997	12.12425014	2.50	0.15	-1.21	Sequía Severa
1998	21.30187381	3.06	0.94	1.42	Severamente Húmedo
1999	21.66335435	3.08	0.95	1.45	Severamente Húmedo
2000	16.74717557	2.82	0.66	0.48	Normal
2001	20.20797815	3.01	0.91	1.30	Severamente Húmedo
2002	14.67854032	2.69	0.42	-0.31	Normal
2003	11.3121734	2.43	0.09	-1.40	Sequía Severa
2004	9.948472463	2.30	0.03	-1.60	Sequía Extrema
2005	13.83232948	2.63	0.32	-0.64	Sequía Moderada
2006	17.45290684	2.86	0.73	0.70	Moderadamente Húmedo
2007	15.60573551	2.75	0.53	0.06	Normal
2008	16.7740516	2.82	0.66	0.49	Normal
2009	19.45401076	2.97	0.87	1.18	Severamente Húmedo
2010	15.53820167	2.74	0.53	0.03	Normal
2011	16.086234	2.78	0.59	0.24	Normal
2012	17.90925731	2.89	0.77	0.84	Moderadamente Húmedo
2013	17.89693828	2.88	0.77	0.83	Moderadamente Húmedo
2014	15.1926309	2.72	0.48	-0.10	Normal
2015	18.55382296	2.92	0.82	1.00	Moderadamente Húmedo
2016	12.47600265	2.52	0.18	-1.11	Sequía Severa

Una vez calculado la condición se procede a graficar los resultados:

Figura. 65: Condición de Sequía para los 6 primeros meses desde 1981 hasta 2026.



Finalmente, el resultado Anual es el siguiente:

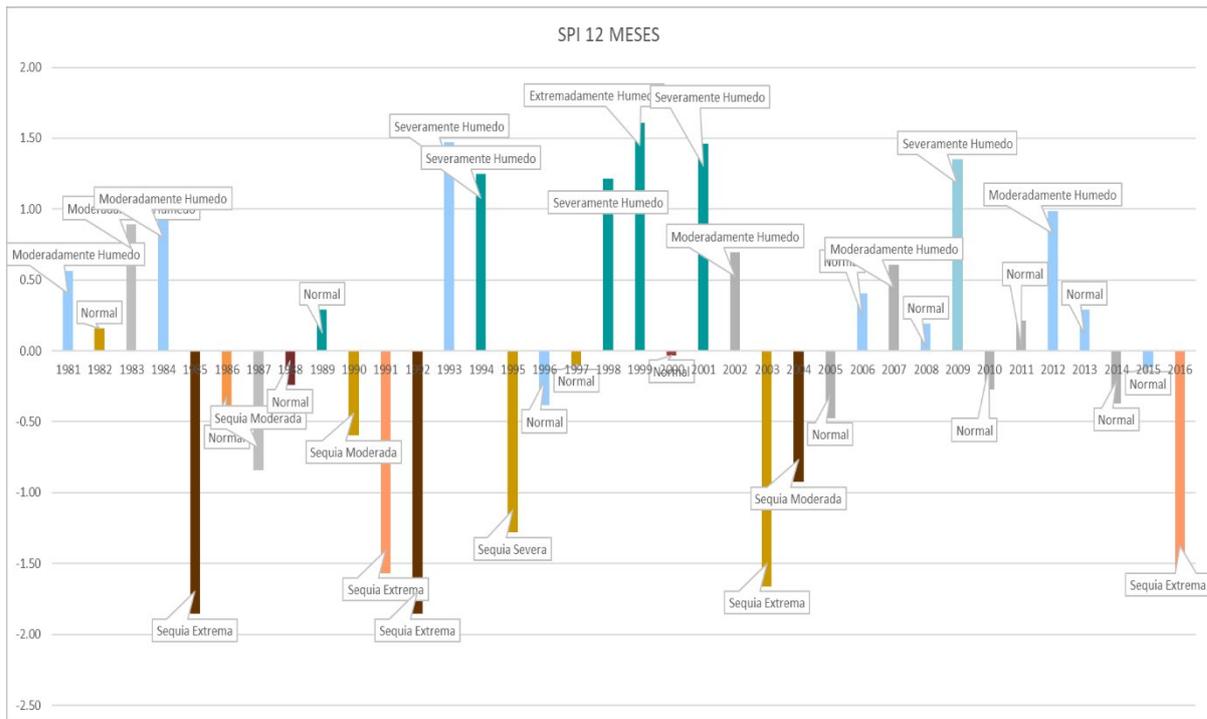
Tabla 27: Índice de sequía para el año completo:

AÑO	PREC	LN PREC	Ajuste Gamma	SPI	CONDICIÓN
1981	27.03047367	3.30	0.68	0.57	Moderadamente Húmedo
1982	25.81625715	3.25	0.56	0.16	Normal
1983	28.16708828	3.34	0.77	0.89	Moderadamente Húmedo
1984	28.44453779	3.35	0.79	0.96	Moderadamente Húmedo
1985	15.84759192	2.76	0.00	-1.86	Sequía Extrema
1986	24.0278499	3.18	0.38	-0.49	Normal
1987	23.01523349	3.14	0.28	-0.84	Sequía Moderada
1988	24.72030269	3.21	0.45	-0.24	Normal
1989	26.18812021	3.27	0.60	0.29	Normal
1990	23.73485229	3.17	0.35	-0.60	Sequía Moderada
1991	20.14304087	3.00	0.08	-1.57	Sequía Extrema
1992	15.92809042	2.77	0.00	-1.86	Sequía Extrema
1993	31.4279717	3.45	0.93	1.47	Severamente Húmedo
1994	29.80776459	3.39	0.87	1.25	Severamente Húmedo

1995	21.52374675	3.07	0.16	-1.28	Sequía Severa
1996	24.33117534	3.19	0.41	-0.38	Normal
1997	25.11240558	3.22	0.49	-0.10	Normal
1998	29.63957068	3.39	0.86	1.22	Severamente Húmedo
1999	33.21431046	3.50	0.97	1.61	Extremadamente Húmedo
2000	25.29507679	3.23	0.51	-0.03	Normal
2001	31.32253811	3.44	0.93	1.46	Severamente Húmedo
2002	27.45461961	3.31	0.71	0.69	Moderadamente Húmedo
2003	19.49310426	2.97	0.06	-1.66	Sequía Extrema
2004	22.76662739	3.13	0.26	-0.93	Sequía Moderada
2005	24.07975481	3.18	0.39	-0.47	Normal
2006	26.53263	3.28	0.63	0.40	Normal
2007	27.15772966	3.30	0.69	0.60	Moderadamente Húmedo
2008	25.90714188	3.25	0.57	0.19	Normal
2009	30.45905232	3.42	0.90	1.35	Severamente Húmedo
2010	24.63217243	3.20	0.44	-0.27	Normal
2011	25.97093286	3.26	0.58	0.21	Normal
2012	28.5541364	3.35	0.80	0.99	Moderadamente Húmedo
2013	26.19359389	3.27	0.60	0.29	Normal
2014	24.36932952	3.19	0.42	-0.37	Normal
2015	25.05992104	3.22	0.49	-0.12	Normal
2016	20.3303688	3.01	0.09	-1.54	Sequía Extrema

Una vez calculado la condición se procede a graficar los resultados:

Figura. 66: Condición de Sequía para el año completo desde 1981 hasta 2016.



4.5.1. Análisis de resultados.

Del cálculo del Índice de Sequía basado en el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para los períodos de 3, 6 y 12 meses, tenemos datos importantes citados a continuación

- *Para los 3 primeros meses del año (Trimestre):*

El SPI varía entre valores negativos y positivos, indicando condiciones que van desde sequía extrema hasta severamente húmedo. Los años notables incluyen 1985, 1992 y 2003 con sequías extremas, mientras que 1999, 2001 y 2016 presentan condiciones severamente húmedas. La condición dominante es normal en varios años, pero también hay presencia de sequías severas, extremas y condiciones húmedas severas. También tenemos las Tendencias: Años como 1993 y 1994 presentan condiciones moderadamente húmedas, indicando una cierta consistencia en esos períodos.

- *Para los 6 primeros meses del año (Semestre):*

El SPI tiene una tendencia similar a los 3 primeros meses, hay variabilidad en el SPI, pero algunos años muestran cambios en la clasificación. Por ejemplo, 2005 cambia de sequía extrema (3 meses) a sequía moderada (6 meses), Las condiciones Extremas se presentan en años como 1999 y 2016 que presentan condiciones extremadamente húmedas y secas, respectivamente, en línea con los resultados trimestrales.

- *Para el año completo:*

En el comportamiento Anual se observa una amplia variabilidad en las condiciones de sequía y humedad a lo largo de los años. Los años notables incluyen 1999 con condiciones extremadamente húmedas y 2016 con sequía extrema. Se tiene una condición Promedio en general, hay una distribución de condiciones, con algunos años siendo moderadamente húmedos o secos, y otros más extremos.

- *Año 2016:*

El año 2016 destaca como un año con sequía extrema en todos los períodos analizados.

- *Períodos Consistentes:*

Algunos años muestran consistencia en sus condiciones a lo largo de los diferentes períodos (por ejemplo, 1999 con condiciones húmedas).

Análisis de Año-Caudal-SPI más representativos

Años con Sequía Severa:

1995:

- Caudal Máximo Anual: 150.39 m³/s (Sequia Severa)
- Variación de Almacenamiento Anual: -89,600,866.26 m³ (Sequia Severa)

- Índice de Sequía: Sequía Severa
- En 1995, se experimentó una sequía severa con un caudal bajo y una variación negativa significativa en el almacenamiento.

2029:

- Caudal Máximo Anual: 151.75 m³/s (Sequia Severa)
- Variación de Almacenamiento Anual: -3,438,488.364 m³ (Sequia Severa)
- Índice de Sequía: Sequía Severa
- En 2029, se registró otra sequía severa, caracterizada por un caudal bajo y una variación negativa en el almacenamiento.

Años más Húmedos:

1999:

- Caudal Máximo Anual: 325.11 m³/s (Extremadamente Húmedo)
- Variación de Almacenamiento Anual: 175,871,468.9 m³ (Extremadamente Húmedo)
- Índice de Sequía: Extremadamente Húmedo
- En 1999, se experimentaron condiciones extremadamente húmedas, con un caudal alto y una variación positiva importante en el almacenamiento.

2017:

- Caudal Máximo Anual: 72.32 m³/s (Severamente Húmedo)
- Variación de Almacenamiento Anual: 199,981,058.6 m³ (Severamente Húmedo)
- Índice de Sequía: Severamente Húmedo
- En 2017, se registraron condiciones severamente húmedas, con un caudal relativamente bajo, pero una variación de almacenamiento muy positiva.

ANÁLISIS DE SEQUIAS EN LA CUENCA DEL MASHCÓN Y DEL CHONTA

Características de los Años con Sequía:

Años con sequía extrema: 1985, 1991, 1992, 2003, 2016.

Años con sequía severa: 1995, 1990, 2024, 2030, 2035.

Caudal Máximo Anual:

Durante los años de sequía extrema, el caudal máximo anual tiende a ser muy bajo, con valores que van desde 81.94 m³/s en 1985 hasta 113.77 m³/s en 2016.

En los años de sequía severa, el caudal máximo anual también es bajo, con valores que oscilan entre 72.14 m³/s en 1992 y 217.22 m³/s en 2036.

Variación de Almacenamiento Anual:

Los años de sequía extrema muestran una variación de almacenamiento anual negativa significativa, indicando una disminución drástica en la cantidad de agua almacenada.

En los años de sequía severa, también se observan variaciones de almacenamiento negativas, aunque pueden ser menos pronunciadas que en los años de sequía extrema.

Impacto en el Índice de Sequía:

Los años de sequía extrema y severa se clasifican en categorías de sequía extrema y severa, respectivamente, según el índice de sequía proporcionado.

VARIACIÓN DE LAS SEQUIAS EN EL ANÁLISIS DE DATOS:

Datos existentes:

- 1990 (Sequía Moderada):

Caudal Máximo Anual: 145.67 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -31,541,323.16 m³

Índice de Sequía: Sequía Moderada

- 1994 (Sequía Severa):

Caudal Máximo Anual: 348.21 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: 89,300,868.63 m³

Índice de Sequía: Severamente Húmedo

- 1995 (Sequía Severa):

Caudal Máximo Anual: 150.39 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -89,600,866.26 m³

Índice de Sequía: Sequía Severa

- 2003 (Sequía Extrema):

Caudal Máximo Anual: 134.89 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -115,905,230.5 m³

Índice de Sequía: Sequía Extrema

La sequía fue en aumento desde 1990 hasta 2003. Comenzó en 1990 como una sequía moderada con un caudal moderadamente bajo y una variación negativa en el almacenamiento. Luego, en 1994 y 1995, la sequía empeoró, pasando a sequía severa, con un caudal aún más bajo y una variación de almacenamiento más negativa. Finalmente, en 2003, la sequía alcanzó su punto máximo, convirtiéndose en una sequía extrema, con un caudal muy bajo y una variación de almacenamiento significativamente negativa.

Datos extendidos:

Secuencia de Sequía Moderada a Severa:

- 2018 (Sequía Moderada):

Caudal Máximo Anual: 182.50 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -25,397,802.18 m³

Índice de Sequía: Sequía Moderada

• 2019 (Sequía Moderada):

Caudal Máximo Anual: 197.31 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -109,557,442 m³

Índice de Sequía: Sequía Moderada

• 2024 (Sequía Severa):

Caudal Máximo Anual: 246.65 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -198,110,305.6 m³

Índice de Sequía: Sequía Severa

Secuencia de Sequía Moderada a Severa a Extrema:

• 2029 (Sequía Severa):

Caudal Máximo Anual: 151.75 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: -3,438,488.364 m³

Índice de Sequía: Sequía Severa

• 2030 (Sequía Severa):

Caudal Máximo Anual: 298.68 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: 124,545,446.6 m³

Índice de Sequía: Sequía Severa

• 2033 (Sequía Extrema):

Caudal Máximo Anual: 114.84 m³/s

Variación de Almacenamiento Anual: 39,959,682.51 m³

Índice de Sequía: Sequía Extrema

En el análisis extendido podemos apreciar que la sequía aumenta gradualmente desde moderada en 2018 y 2019, pasando a sequía severa en 2024. En la segunda secuencia, la sequía comienza como moderada en 2029 y empeora a severa en 2030, alcanzando finalmente una sequía extrema en 2033.

El análisis del índice de sequía se realizó desde el año 1981 hasta 2016 y luego se extendieron los datos hasta el año 2041

TIPOS DE SEQUÍA DETERMINADOS SEGÚN EL ÍNDICE SPI

Sequía Severa

Descripción:

La sequía severa se caracteriza por una marcada escasez de agua, lo que conduce a una disminución significativa en los caudales de los ríos y una reducción drástica en el almacenamiento de agua. Esto puede tener graves repercusiones en la disponibilidad de agua para el consumo humano, la agricultura y la vida silvestre, así como en la generación de energía hidroeléctrica.

Causas:

Deficiencia Prolongada de Precipitación: Un período extendido de lluvias insuficientes que reduce la recarga de acuíferos y cuerpos de agua superficiales.

Alta Demanda de Agua: Incremento en el uso de agua para riego, industria y consumo humano que no es sostenible durante períodos de poca precipitación.

Cambio Climático: Alteraciones en los patrones de lluvia debido al calentamiento global, resultando en eventos climáticos extremos más frecuentes y severos.

Sequía Extrema

Descripción:

La sequía extrema es el nivel más severo de sequía, caracterizado por una grave falta de precipitación y una escasez extrema de agua. En estos casos, se observa una disminución crítica en los caudales de los ríos y un agotamiento significativo de los recursos hídricos, lo que puede tener impactos devastadores en la agricultura, la industria, el suministro de agua potable y el ecosistema en general.

Causas:

Períodos Prolongados de Sequía: Extensas temporadas sin lluvias significativas, reduciendo drásticamente los niveles de agua subterránea y superficial.

Eventos Climáticos Anómalos: Fenómenos como El Niño y La Niña que pueden causar variaciones extremas en la precipitación.

Explotación Intensiva de Recursos Hídricos: Sobreexplotación de acuíferos y cuerpos de agua sin una gestión adecuada que agrava la escasez durante períodos secos.

Sequía Moderada

Descripción:

La sequía moderada se encuentra en un nivel intermedio entre la sequía leve y la sequía severa. Se caracteriza por una reducción en los caudales de los ríos y una disminución en el almacenamiento de agua, lo que puede afectar la disponibilidad de agua para usos domésticos y agrícolas, así como aumentar el estrés en los ecosistemas acuáticos.

Causas:

Reducción Moderada de Precipitación: Períodos con menos lluvias de lo normal pero no extremos, afectando principalmente los caudales y el almacenamiento de agua.

Demanda Constante de Agua: Uso constante de agua que puede ser manejable en condiciones normales pero se vuelve problemático durante períodos de lluvias reducidas.

Manejo Ineficiente del Agua: Falta de infraestructura o políticas adecuadas para conservar y gestionar el agua de manera eficiente durante períodos de escasez.

Sequía Normal

Descripción:

La sequía normal es un término relativo que indica que las condiciones de sequía no son significativamente peores ni mejores de lo esperado para un período de tiempo y ubicación determinados. Aunque puede haber una ligera reducción en los caudales de los ríos y el almacenamiento de agua, las condiciones no son lo suficientemente graves como para causar preocupación significativa.

Causas:

Variabilidad Estacional: Fluctuaciones normales en las precipitaciones que se esperan en ciertos períodos del año.

Patrones Climáticos Regulares: Condiciones meteorológicas típicas de una región que incluyen períodos secos intercalados con períodos más húmedos.

Manejo Sostenible de Recursos: Prácticas adecuadas de gestión y uso del agua que aseguran que incluso durante períodos más secos, los impactos sean mínimos.

REPERCUSIONES DE LAS SEQUIAS EN LAS CUENCAS DEL RÍO MASHCÓN Y CHONTA

Sequía Moderada en la Cuenca del Río Mashcón y Chonta:

Reducción gradual en los caudales de los ríos Mashcón y Chonta, así como en los niveles de agua en los embalses dentro de la cuenca.

Posibles restricciones en el uso del agua para riego agrícola en las tierras cercanas a los ríos, lo que podría resultar en una disminución en los rendimientos de los cultivos como maíz, arroz y caña de azúcar.

Aumento del estrés hídrico en la vegetación circundante, incluyendo bosques y pastizales, lo que podría llevar a la pérdida gradual de cobertura vegetal y la degradación del suelo en la cuenca.

Sequía Severa en la Cuenca del Río Mashcón y Chonta:

Reducción significativa en los caudales de los ríos Mashcón y Chonta y en los niveles de agua en los embalses, lo que afecta la disponibilidad de agua potable para las comunidades locales y la vida acuática en los ecosistemas fluviales.

Escasez crítica de agua para el riego agrícola, lo que resulta en pérdidas económicas considerables para los agricultores de la cuenca, así como posibles conflictos por el acceso al agua.

Disminución en la biodiversidad acuática en los ríos Mashcón y Chonta, con impactos negativos en las poblaciones de peces, aves acuáticas y otros organismos dependientes del agua.

Sequía Extrema en la Cuenca del Río Mashcón y Chonta:

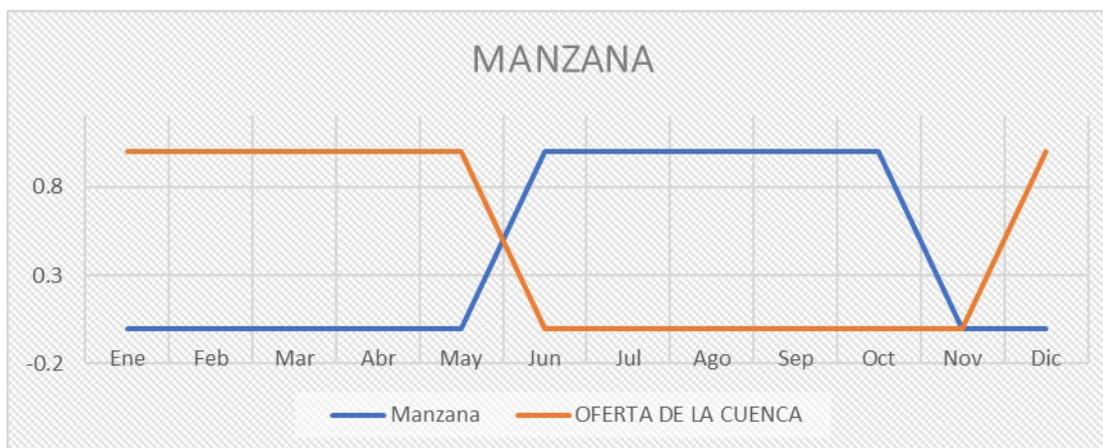
Escasez crítica de agua que afecta drásticamente la disponibilidad de agua potable para las comunidades locales, poniendo en riesgo la salud y el bienestar de la población.

Pérdida masiva de cultivos debido a la falta de riego, lo que resulta en una crisis alimentaria en la cuenca y la necesidad de ayuda externa para satisfacer las necesidades básicas de alimentación.

Colapso de ecosistemas acuáticos en los ríos Mashcón y Chonta, con impactos devastadores en la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, como la regulación del ciclo del agua y la provisión de hábitats para la vida silvestre.

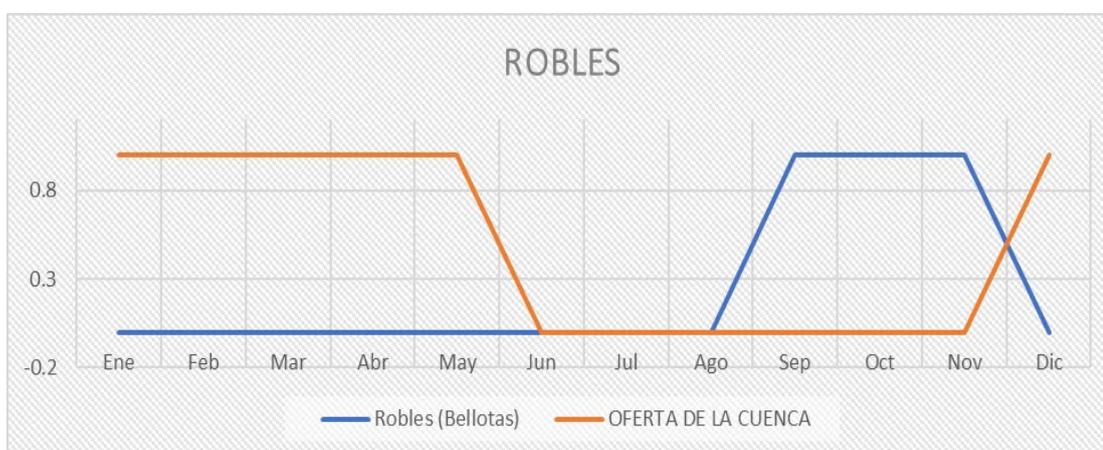
IMPACTO PARA USO AGRÍCOLA DE LAS SEQUIAS EN LAS CUENCAS DEL RÍO MASHCÓN Y CHONTA

Figura. 67: Análisis de impacto en el cultivo de Manzana en la Cuenca del Mashcón y Chonta.



Del gráfico anterior, se observa que la manzana tiene su etapa de crecimiento a partir de junio hasta noviembre, estos meses son los meses donde según el balance hídrico el déficit de agua es mayor en la cuenca del Mashcón y Chonta, por ende, afecta directamente el cultivo de este fruto disminuyendo su producción.

Figura. 68: Análisis de impacto en el cultivo de Robles en la Cuenca del Mashcón y Chonta.



En este caso observamos que los robles crecen a partir de Agosto hasta diciembre, siendo los meses de agosto hasta noviembre donde el déficit afectaría directamente al crecimiento de este cultivo en la cuenca del Mashcón y Chonta

Figura. 69: Análisis de impacto en el cultivo de Granos en la Cuenca del Mashcón y Chonta.



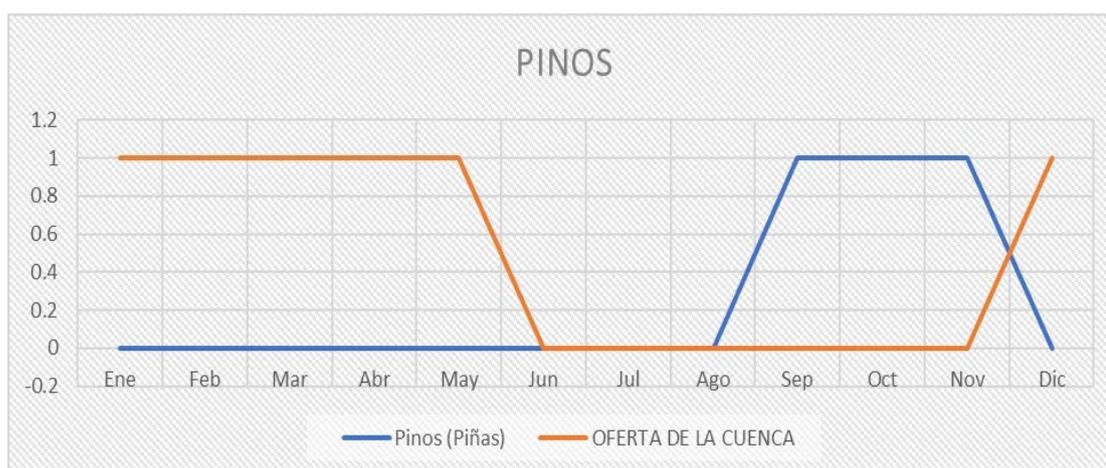
Para el cultivo de granos observamos que entre los meses de Abril y Mayo las sequias no afectarían en el cultivo de granos, a partir de junio hasta septiembre donde acaba la época de abundancia de este cultivo, se ve afectado por el déficit influyendo en su cultivo.

Figura. 70: Análisis de impacto en el cultivo de Matorrales en la Cuenca del Mashcón y Chonta.



Los matorrales crecen en todas las estaciones del año, siendo afectados en los meses de mayo hasta noviembre donde es la etapa de déficit de agua en la Cuenca del Mashcón y Chonta .

Figura. 71: Análisis de impacto en el cultivo de Pinos en la Cuenca del Mashcón y Chonta.



Finalmente los Pinos al igual que los robles crecen a partir de Agosto hasta diciembre, los meses de agosto a noviembre son aquellos en los que el déficit impactaría directamente en el crecimiento de este cultivo en la cuenca del Mashcón y Chonta.

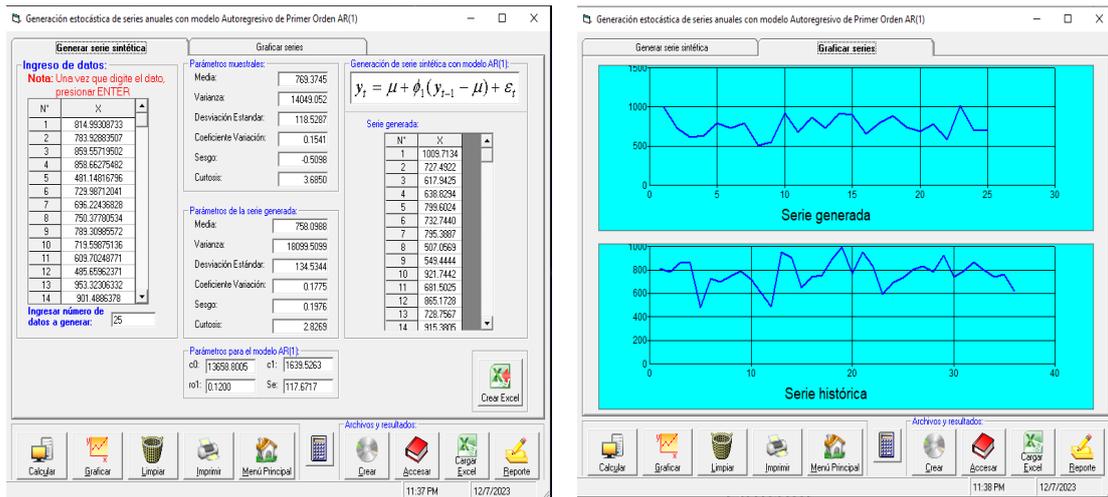
4.6. Extensión de los resultados:

Una vez realizado el cálculo del índice de sequía y calculado también el balance hídrico, podemos extender los datos usando la metodología AR(1) Markoviana, primero procedemos a extender los resultados del balance Hídrico, para ello, realizamos la extensión de los datos obtenidos por Pisco, de Precipitación, Evapotranspiración y los caudales obtenidos en SWAT.

4.6.1. Extensión del Balance Hídrico.

- Datos de Precipitación:

Figura. 72: Extensión de datos de Precipitación Pisco en 25 años.



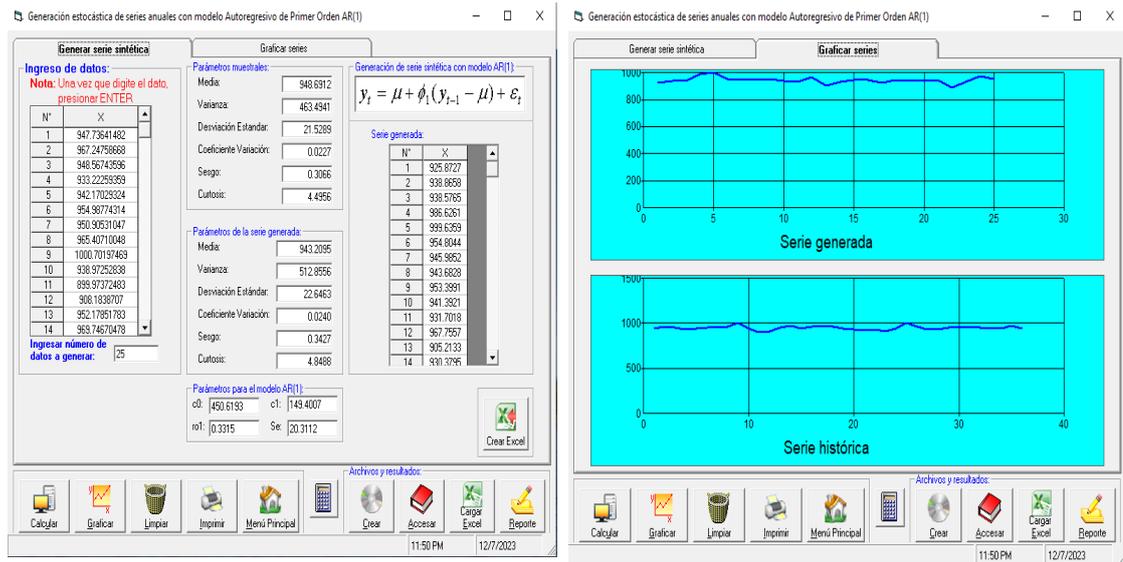
Los 25 datos extendidos van desde el año 2017 hasta el año 2041.

Tabla 28: Datos de Precipitación Extendidos:

Año	PRECIPITACIÓN
2017	1009.71
2018	727.49
2019	617.94
2020	638.83
2021	799.60
2022	732.74
2023	795.39
2024	507.06
2025	549.44
2026	921.74
2027	681.50
2028	865.17
2029	728.76
2030	915.38
2031	894.53
2032	652.51
2033	799.15
2034	890.68
2035	744.10
2036	687.52
2037	784.70
2038	586.74
2039	1014.73
2040	694.72
2041	712.31

- Datos de Evapotranspiración:

Figura. 73: Extensión de datos de Evapotranspiración Pisco en 25 años.



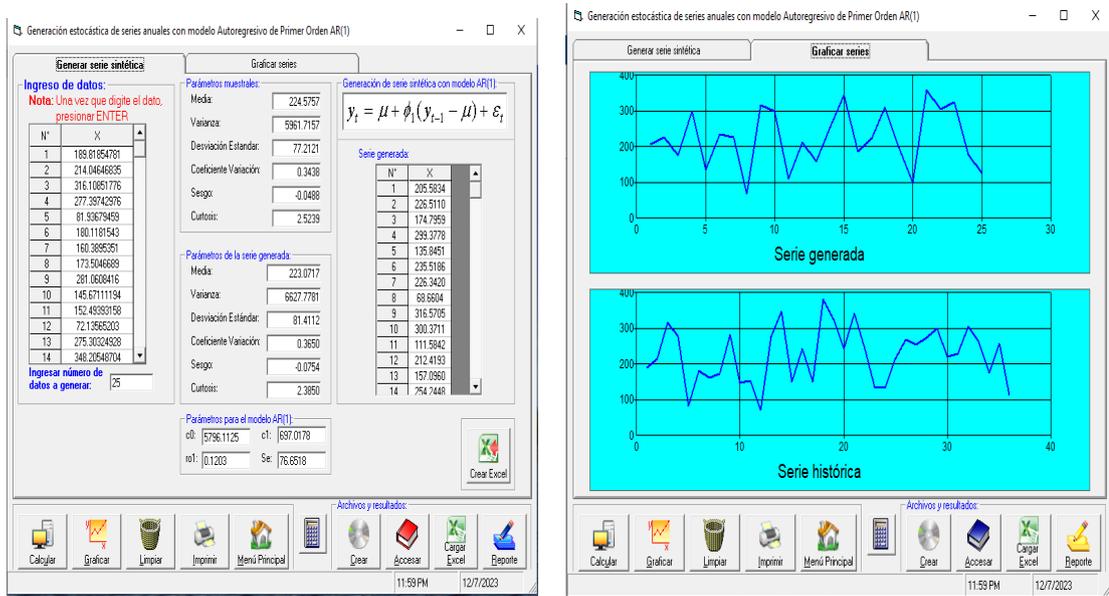
Los 25 datos extendidos van desde el año 2017 hasta el año 2041.

Tabla 29: Datos de Precipitación Extendidos:

Año	Evapotranspiración
2017	925.8727
2018	938.8658
2019	938.5765
2020	986.6261
2021	999.6359
2022	954.8044
2023	945.9852
2024	943.6828
2025	953.3991
2026	941.3921
2027	931.7018
2028	967.7557
2029	905.2133
2030	930.3795
2031	944.3027
2032	945.5068
2033	922.5315
2034	944.1517
2035	936.5184
2036	936.5022
2037	942.3128
2038	890.9117
2039	931.9845
2040	973.0527
2041	948.5714

- Datos de Caudales:

Figura. 74: Extensión de datos de Caudales Calculados por el modelo SWAT en 25 años.



Los 25 datos extendidos van desde el año 2017 hasta el año 2041.

Tabla 30: Datos de Precipitación Extendidos:

Año	Caudal
2017	189.818548
2018	214.046468
2019	316.108518
2020	277.39743
2021	81.9367946
2022	180.118154
2023	160.389535
2024	173.504669
2025	281.060842
2026	145.671112
2027	152.493932
2028	72.135652
2029	275.303249
2030	348.205487
2031	150.393037
2032	241.51785
2033	150.779613
2034	381.673408
2035	325.106775

2036	242.956424
2037	341.703144
2038	243.153022
2039	134.893507
2040	132.259187
2041	215.583333

- Balance Hídrico extendido:

El balance Hídrico se calculó de igual manera como se calculó el balance hídrico para los datos conocidos, teniendo los siguientes resultados:

Figura. 75:Proyección del balance Hídrico en 25 años.

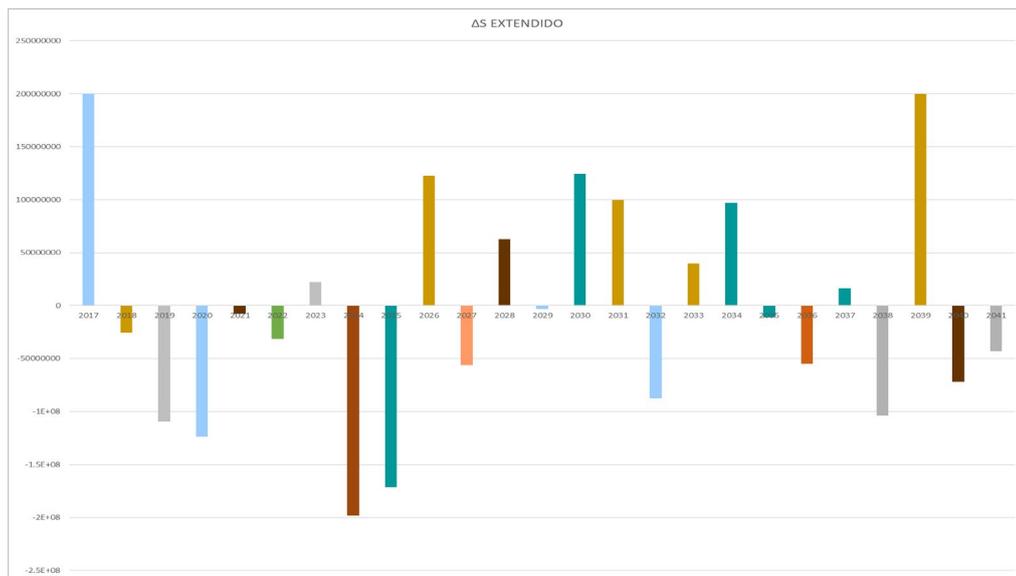


Tabla 31: Datos del balance Hídrico Proyectado para 25 años:

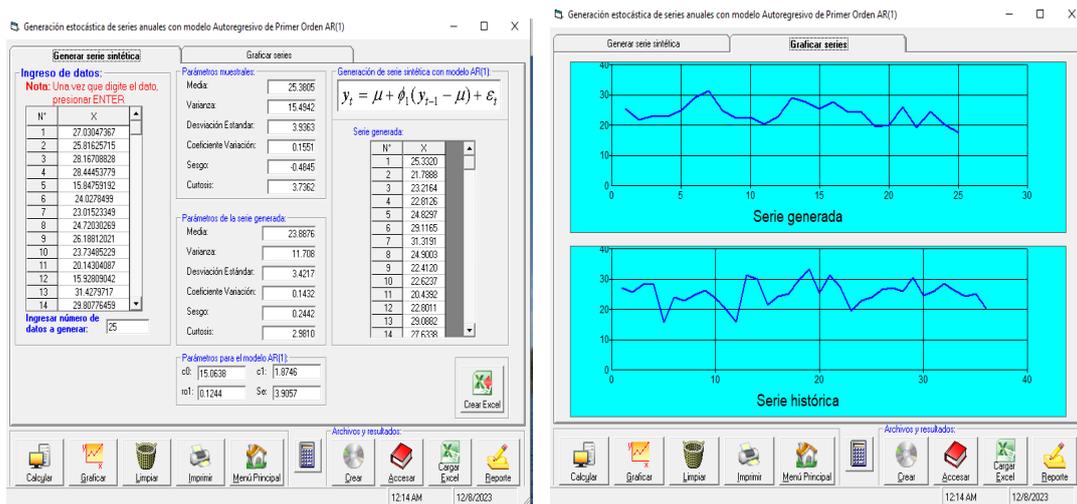
Año	ΔS
2017	199981130
2018	-25397620.4
2019	-109557245
2020	-123440689
2021	-7777842.53
2022	-31293713.8
2023	22434808.4
2024	-198110060
2025	-171535912
2026	122577544
2027	-56336646.9
2028	62584003.3
2029	-3438337.33

2030	124545745
2031	99812304.2
2032	-87265657.5
2033	39959797
2034	96943049.9
2035	-11148855.1
2036	-54698516.6
2037	16494223.6
2038	-103852680
2039	200032437
2040	-71948048.5
2041	-43136895.9

4.6.2. Extensión del Índice de Sequía.

Para realizar la extensión y por ende la predicción del índice de sequía, extenderemos primero los datos anuales calculados del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) usando el modelo AR(1), con ello tenemos:

Figura. 76:Proyección del Índice estandarizado de Precipitación en 25 años.



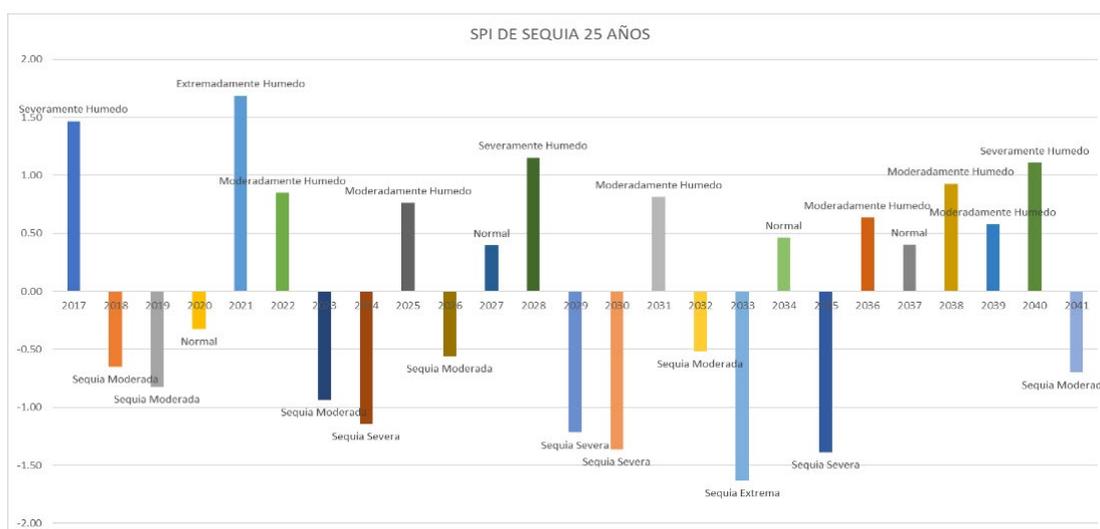
Finalmente teniendo el SPI se procede a calcular y graficar el índice de sequía para los años proyectados:

Tabla 32: Índice de sequía proyectado para 25 años:

AÑO	PREC	SPI	CONDICIÓN
2017	29.7062	1.47	Severamente Húmedo
2018	22.9433	-0.65	Sequia Moderada
2019	22.4714	-0.82	Sequia Moderada
2020	23.7598	-0.32	Normal
2021	33.3609	1.69	Extremadamente Húmedo
2022	26.8263	0.85	Moderadamente Húmedo
2023	22.1485	-0.93	Sequia Moderada
2024	21.469	-1.14	Sequia Severa
2025	26.5517	0.76	Moderadamente Húmedo
2026	23.1754	-0.56	Sequia Moderada
2027	25.5335	0.40	Normal
2028	27.9247	1.15	Severamente Húmedo
2029	21.1915	-1.22	Sequia Severa
2030	20.5677	-1.36	Sequia Severa
2031	26.7036	0.81	Moderadamente Húmedo
2032	23.2764	-0.52	Sequia Moderada
2033	18.458	-1.63	Sequía Extrema
2034	25.7018	0.46	Normal
2035	20.4351	-1.39	Sequia Severa
2036	26.179	0.64	Moderadamente Húmedo
2037	25.5454	0.40	Normal
2038	27.0803	0.93	Moderadamente Húmedo
2039	26.0172	0.58	Moderadamente Húmedo
2040	27.743	1.11	Severamente Húmedo
2041	22.8118	-0.70	Sequia Moderada

Finalmente tenemos el grafico del Índice de Sequia Extendido:

Figura. 77: Índice de Sequía Projectado en 25 años



4.6.3. Análisis de resultados.

Proyección del Balance Hídrico (ΔS):

La proyección muestra una variabilidad significativa en el balance hídrico a lo largo de los años. Los años 2017, 2023, 2026, 2030 y 2031 presentan saldos positivos notables, indicando períodos con un excedente de agua. Los años 2020, 2024, 2025, 2027, 2032, 2036 y 2040 tienen saldos negativos, indicando años con déficit de agua. La proyección muestra una mezcla de años con excedentes y déficits de agua, lo que indica una variabilidad en el suministro de agua a lo largo del tiempo. La proyección incluye algunos años con saldos extremos, y sería interesante comparar estos resultados con eventos climáticos o cambios en la gestión del agua.

Índice de Sequía Projectado (SPI):

La proyección del SPI muestra variabilidad en los próximos años, con condiciones que varían desde sequía extrema hasta extremadamente húmedo. El año 2021 destaca como un año extremadamente húmedo, mientras que los años 2018, 2019, 2024, 2029, 2030 y 2035 muestran condiciones de sequía de moderada a extrema. La proyección muestra una mezcla de años con diferentes condiciones de sequía, indicando una variabilidad en el suministro de precipitación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1.1. Conclusión general

- El Índice de Sequía Proyectado para el año 2023 muestra condiciones de sequía moderada, al igual que los años 2018 y 2019 con una variación de índice SPI entre -0.5 a -1.

5.1.2. Conclusiones específicas

- La cuenca tiene un área de 664.03 km² y un perímetro de 134.94 km, con forma irregular, indicada por un coeficiente de compacidad de 1.62 y un factor de forma de 0.39. Sus dimensiones equivalentes a un rectángulo son 40.74 km y 6.68 km. La altitud varía de 2617 a 4232 msnm, con pendientes del 15.1% en la cuenca y 1.35% en el cauce principal. Estos datos son cruciales para la gestión de recursos hídricos, predicción de inundaciones y estudios del ciclo del agua en la región.
- Hay variabilidad en los caudales a lo largo de los años. Los niveles más altos se observan en 1998, 1994 y 2001, mientras que 1992 registra el caudal más bajo. La mayoría de los caudales se sitúan entre 0.4 y 0.8, con algunos valores atípicos alrededor de 1.0. La variabilidad temporal es significativa, y se destacan caudales extremos en 1998 (máximo) y 1992 (mínimo), indicando posibles eventos extremos o condiciones inusuales.
- Se calcularon 13,500 datos para la calibración y validación del modelo SWAT (1988-1993). La calibración con datos de Mashcón, se realizó con 500 iteraciones, la mejor solución es la iteración 111. La validación se hizo con datos de Jesús Túnel, la mejor solución es la iteración 289. Datos extremadamente aproximados en la post-validación.
- El Modelo SWAT realizó el cálculo en cm³/s, teniendo un caudal máximo de 174.4 cm³/s el 13 de febrero de 1999. Las Estadísticas anuales son : Promedio \approx 217.89 m³/día, Máximo en 1998 (381.67 m³/día), Mínimo en 1992 (72.14 m³/día).
- Se evaluó el Índice de Sequía utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para 3, 6 y 12 meses. Destacan variabilidades notables: en el primer trimestre, desde sequía extrema (1985, 1992, 2003) hasta condiciones húmedas (1999, 2001, 2016); el primer semestre muestra cambios similares, con notables diferencias en 2005. A lo largo del año, se observa amplia variabilidad, resaltando 1999

(extremadamente húmedo) y 2016 (sequía extrema). El 2016 se destaca como un año de sequía extrema en todos los períodos. Algunos años, como 1999, muestran consistencia en condiciones húmedas a lo largo de los diferentes períodos analizados.

- La proyección del Balance Hídrico (ΔS) en MMC revela una variabilidad significativa a lo largo de los años. 2017, 2023, 2026, 2030 y 2031 muestran excedentes notables, mientras que 2020, 2024, 2025, 2027, 2032, 2036 y 2040 presentan déficits. Esta variabilidad indica fluctuaciones en el suministro de agua con años de saldos extremos. La proyección del Índice de Sequía (SPI) también muestra variabilidad, con condiciones que van desde sequía extrema hasta extremadamente húmedo. Destaca el año 2021 como extremadamente húmedo, mientras que 2018, 2019, 2024, 2029, 2030 y 2035 muestran sequía severa o extrema. La mezcla de condiciones indica una variabilidad en el suministro de precipitación, y se sugiere comparar estos resultados con eventos climáticos o cambios en la gestión del agua.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Implementar un programa integral de infraestructuras y estrategias de conservación en las cuencas del río Mashcón y Chonta para mitigar las sequías.
- Incluir construcción de embalses, sistemas de captación de agua de lluvia, tecnologías de reutilización de aguas grises y promoción de prácticas agrícolas sostenibles y reforestación.
- Los datos sobre las dimensiones de la cuenca y la altitud son valiosos para la predicción de inundaciones. Se recomienda utilizar esta información para mejorar los modelos de predicción de inundaciones y desarrollar sistemas de alerta temprana.
- Dada la importancia de la cuenca en los estudios del ciclo del agua, se sugiere realizar análisis más detallados sobre la relación entre la topografía, la altitud y la variabilidad del caudal. Esto podría proporcionar información adicional para comprender mejor los procesos hidrológicos en la región.
- Es positivo que el modelo SWAT haya sido validado con datos de diferentes períodos. Sin embargo, se recomienda continuar validando el modelo a medida que se recopilen nuevos datos para garantizar su precisión y utilidad a lo largo del tiempo.
- Para comprender mejor las fluctuaciones en el suministro de agua, se recomienda comparar los resultados con eventos climáticos significativos. Esto podría implicar el análisis de patrones climáticos, fenómenos atmosféricos y cambios en las condiciones climáticas globales.
- Teniendo la variabilidad proyectada en el Balance Hídrico y el Índice de Sequía, se sugiere establecer un sistema de monitoreo continuo de las condiciones hidrológicas y climáticas. Esto permitirá una respuesta más rápida a condiciones extremas y facilitará la planificación a largo plazo.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio Mijares, F. Javier. (2018). Fundamentos de hidrología de superficie (Editorial Limusa S.A., Ed.; Primera-2018). Noriega.
- Cairapoma. (2021). Análisis de sequías usando series sintéticas en la cuenca del río Mantaro.
- Carrasco Jordán. (2018). Caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca alto Jequetepeque mediante índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Edward Andy Marín Melo Pág, B. (2020). Determinación del balance hídrico superficial de la cuenca del río Santa para satisfacción de la demanda existente.
- Gálvez, S. (2019). Generación de información hidrométrica con fines de aprovechamiento hídrico para la cuenca El Porvenir, distrito de Huarango.
- Marcelo Villarroel. (2020). Geomorfología de cuencas (Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ed.; Segunda).
- Montes, V. (n.d.). Estimación de índices de sequía en la cuenca del río Ichu utilizando datos de teledetección-Huancavelica-2019.
- Moraguz-Iglesias, A., de Pilar Espinosa-Torres, M., & Morales-Peralta, L. (2019). La prueba de hipótesis Kolmogorov-Smirnov para dos muestras grandes con una cola (Issue 3).
- Ortiz Vásquez. (2018). Caracterización de sequías en la cuenca del río Puyango-Tumbes en base a los índices de flujo base y precipitación estandarizada.

- Paulo de Sousa Oliveira, A. (2022). Projection of land use to 2030 and its impacts on water availability in a Brazilian sub-basin: A LCM and SWAT approach. *Geofísica Internacional*, 61(1), 66–87.
- Prieto Villarroya, J., Farias, H. D., & Amarilla, M. E. (2018). Estimación del parámetro hidrológico del número de curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo.
- Ramón, M., Blanquer, G., & MI, J. (2018). Morfología de las cuencas hidrográficas. UPV.
- SENAMHI. (2022). Balance hídrico superficial (Novoa Goicochea, Ed.; Primera).
- SENAMHI. (2022). Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico (Tercera).
- SENAMHI. (2023). SPI (Índice estandarizado de precipitación).
- Soil and Water Assessment Tool. (2018). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario versión SWAT 2005.
- Solís, F. H., Iván, W., & Terán, V. (2017). Variabilidad climática y ocurrencia de sequías en la región de Cajamarca.
- UNESCO. (2019). FAO-Unesco Mapa mundial de suelos (Octava).
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2015). Sequía, un problema de perspectiva y gestión: Vol. XVII (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Ed.; Primera).
- Zuñiga. (2021). Impactos del cambio climático sobre las sequías en la cuenca río Tambo-Perú, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

LINKOGRAFÍA

- Bateman, A. (2018). Hidrología básica y aplicada. www.gits.ws
- Mardian, J. (2022). The role of spatial scale in drought monitoring and early warning systems: a review. <https://doi.org/10.1139/ER-2021-0102>
- Moraguez-Iglesias, A., de Pilar Espinosa-Torres, M., & Morales-Peralta, L. (2019). La prueba de hipótesis Kolmogorov-Smirnov para dos muestras grandes con una cola. <http://luz.uho.edu.cu>
- PGIS. (2021). Manual de indicadores e índices de sequías. www.droughtmanagement.info
- Prieto Villarroya, J., Farias, H. D., & Amarilla, M. E. (2018). Estimación del parámetro hidrológico del número de curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/publicaciones/codinoa-2013/trabajos/tierra/27-prieto.pdf>
- Sardon, H.; Lavado-Casimiro, W. Y., & SENAMHI. (2022). Inventario de datos de eventos de inundaciones del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1786>
- SISSA. (2021, August). Índices de sequía-Resumen.
- SENAMHI. (2023). SPI (Índice estandarizado de precipitación). www.senamhi.gob.pe//1

CAPÍTULO VIII:

ANEXOS

ANEXO I: Código de descarga de datos PISCO en el lenguaje de programación

R:

```
setwd("D:/PISCO")
```

```
rm(list=ls())
```

```
install.packages("raster")
```

```
install.packages("ncdf4")
```

```
library(raster)
```

```
library(ncdf4)
```

```
long_lat <- read.csv("long_lat.csv",header=T)
```

```
raster_pp <- raster::brick("PISCOpd.nc")
```

```
sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
```

```
raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
```

```
points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
```

```
data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
```

```
colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
```

```
write.csv(data_long_lat,
```

```
  "data_long_lat_TRESMOLINOSPRECIPITACION.csv",quote = F)
```

ANEXO II: Datos de la estación Jesús túnel usados para la Calibración y

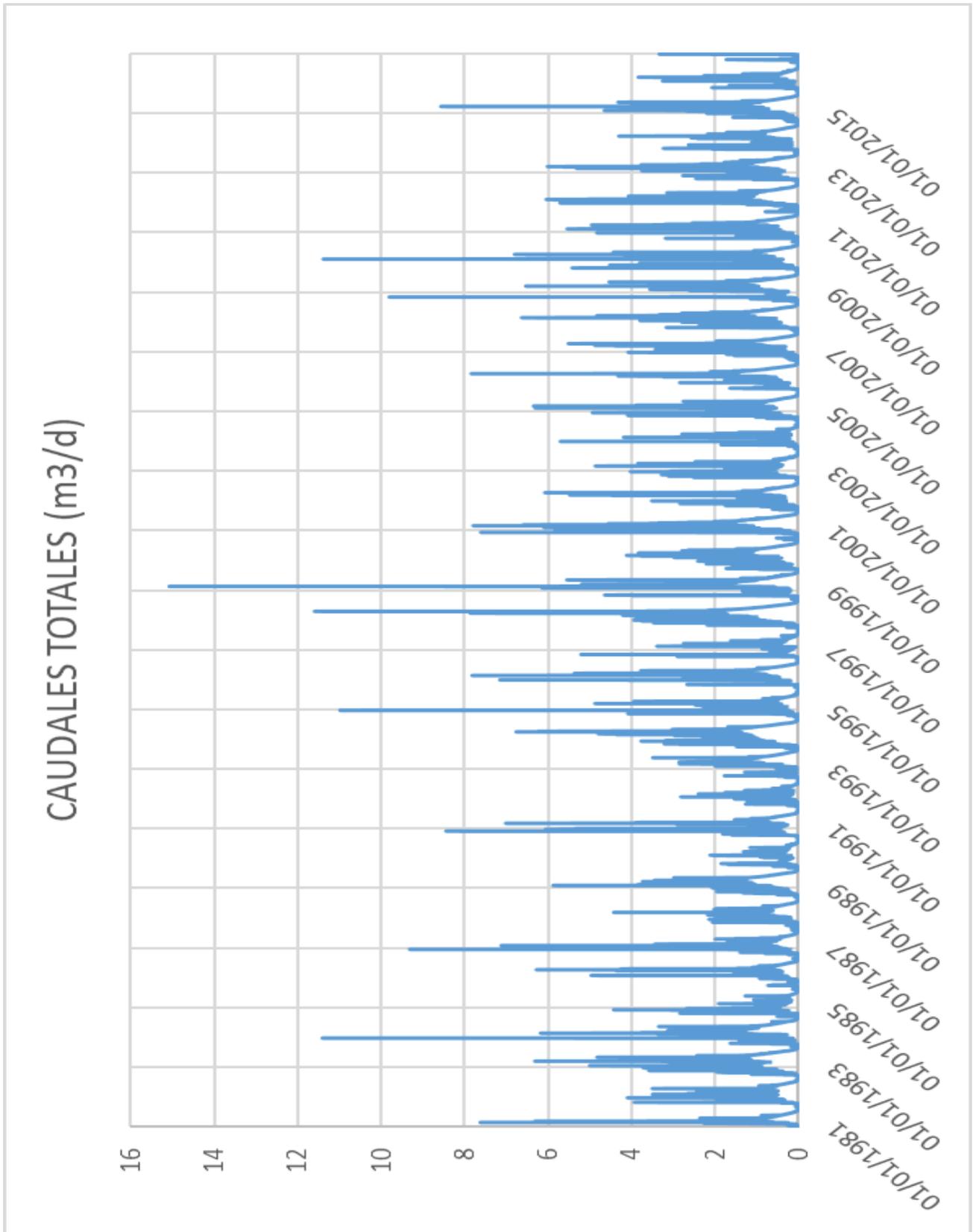
Validación:

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Set	Oct	Nov	Dic	Prome dio
1968										3.5 29	1.99 3	2.26 6	2.6
1969	1.53 2	4.1	3.14 2	8.79	1.25 5	0.8 97	0.5 13	0.3 81	0.1 3	2.1 1	6.74 7	10.6 97	3.36
1970	8.63 9	5.97 9	9.40 7	5.81 3	5.18 4	1.7 1	0.5 94	0.1 71	0.1 87	2.8 97	8.12	9.71	4.87
1971	6.67 1	10.0 86	37.3 45	33.1 63	9.07 1	4.1 1	1.4 94	1.4 42	1.4 1	5.4 77	4.45 7	7.42 6	10.18
1972	7.26 5	2.76 9	14.5 81	15.7 1	6.44 5	1.8 63	0.8 58	0.4 39	1.1 5	1.8	2.27	4.98 1	5.01
1973	6.15 8	4.66 1	9.93 9	25.1	6.77 4	2.6 77	1.8 23	1.4 9	4.9 57	8.2 16	11.6	9.30 7	7.73
1974	11.9 77	27.9 5	21.9 26	10.5 67	2.85 5	1.9 97	1.1 36	0.8 13	0.8 17	4.8 97	2.18 3	4.32 9	7.62
1975	5.40 3	16.9 07	32.8 29	22.6 1	11.7 03	4.4 87	1.9 26	1.0 26	1.9 43	5.2 84	4.34 3	0.59 7	9.09
1976	5.78 4	8.13 8	14.2 39	9.43 7	3.26 5	0.9 9	0.5 77	0.3 77	0.1 9	0.2 48	0.67 3	0.81 6	3.73
1977	4.87 7	19.8 14	11.4 58	10.2 9	3.37 3	1.0 83	0.4 58	0.2 19	0.1 31	1.4 09	2.70 7	3.38 7	4.93
1978	1.14 3	0.93	1.57	2.05 4	3.76	0.3 01	0.2 82	0.1 06	0.0 71	0.1 35	1.34 1	1.89 5	1.13
1979	2.52 8	5.72 9	23.8 91	6.95 1	1.43								8.11
1980									0.1 29	3.2 14	12.0 2	19.9 91	8.84
1981	2.85 3	28.1 89	16.4 02	2.95 3	1.57 2	0.8 14	0.4 19	0.1 38	0.1 58	1.9 42	4.49	10.5 87	5.88
1982	4.92 9	15.5 18	8.04 8	10.5 4	2.54 8	0.8 7	0.2 29	0.1 32	0.3 43	4.0 07	4.51 3	16.0 97	5.65
1983	12.0 74	5.85 4	16.9 45	13.9 87	6.86 5	1.4 3	0.3 97	0.2 58	0.6 13	1.9 48	0.86 3	9.5	5.89
1984	2.16 5	36.9 39	25.3 87	14.9 47	12.8 74	3.5 87	1.9 13	0.7 74	0.8 9	4.4 84	3.12	5.61 3	9.39
1985	3.98 4	3.97 5	2.43 6	4.38 3	1.7	0.4 17	0.1 19	0.1 26	0.1 93	0.6 39	0.20 3	3.53 2	1.81
1986	4.65 2	4.85 4	5.77 7	10.4 37	3.42 3	0.6 83	0.1 1	0.0 66	0.0 5	0.3 03	2.03 7	3.89 7	3.02
1987	10.7 89	10.0 24	3.90 7	2.42 5	4.71 1	0.2 52	0.0 78	0.1 51	0.1 04	0.3 06	3.46 1	4.36 4	3.38
1988	10.1 47	16.4	8.89 9	10.2 91	4.04 7	0.7 32	0.2 24	0.0 81	0.2 08	0.6 73	4.16 7	2.56 4	4.87
1989	10.2 24	22.9 91	22.2 3	27.3 03	4.84 8	0.6 5	0.2 48	0.1 13	0.5 37	7.5 4	3.04 9	0.48 1	8.35

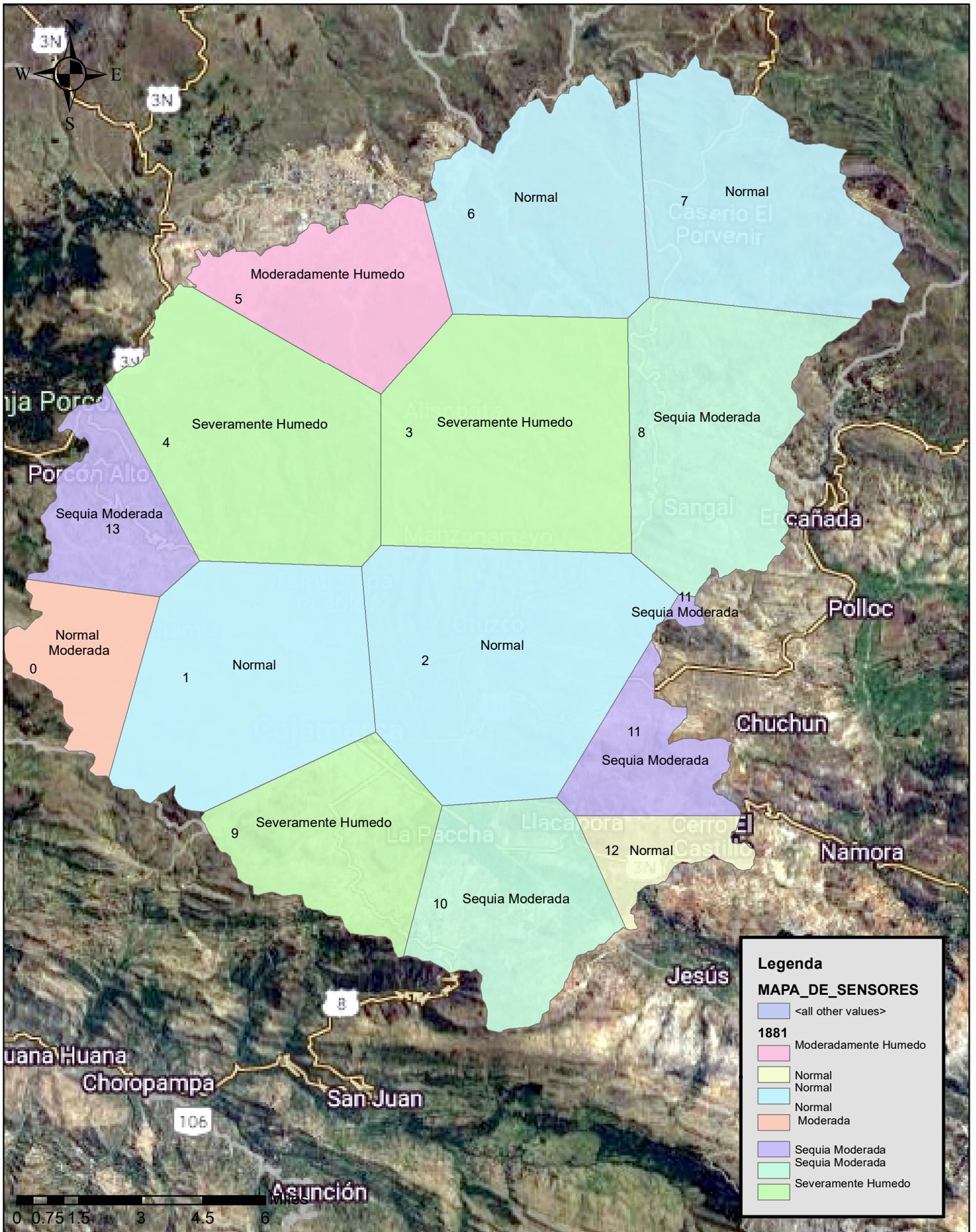
1990	4.08 3	6.65 1	2.40 5	3.62 7	2.13 3	1.1 21	0.1 88	0.0 94	0.0 58	3.4 85	8.56	7.24	3.3
1991	3.75 4	6.33 6	16.3 26	8.00 1	3.13 7	0.5 14	0.2 33	0.1 87	0.1 12	0.1 77	0.26 3	0.65 2	3.31
1992	2.61	0.13 9	1.14 2	3.63 3	0.63 2	0.2 4	0.1 68	0.0 81	0.1 09	2.6 84	0.99 3	0.18 1	1.05
1993	1.03 9	11.2 32	29.2 42	15.6 03	4.16 8	0.9 33	0.3 39	0.1	0.2 2	3.6 89	12.2 24	12.5 83	7.61
1994													
1995													
1996													
1997													
1998									1.4 06		0.35 1		0.88
Resumen	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Set	Oct	Nov	Dic	Prome dio
Máximo	12.0 7	36.9 4	37.3 4	33.1 6	12.8 7	4.4 9	1.9 3	1.4 9	4.9 6	8.2 2	12.2 2	19.9 9	10.18
Mínimo	1.04	0.14	1.14	2.05	0.63	0.2 4	0.0 8	0.0 7	0.0 5	0.1 4	0.2	0.18	0.88
Promedio	5.64	11.5 1	14.1 4	11.6 1	4.49	1.4 1	0.6 2	0.3 8	0.6 4	2.8 4	4.11	6.11	5.24
Desviación estandar	3.43	9.66	10.4 1	8.29	3.15	1.2 2	0.6	0.4 3	1.0 4	2.2 6	3.64		2.77
Mediana	4.9	7.39	12.8 5	10.2 9	3.59	0.9 3	0.4	0.1 7	0.1 9	2.6 8	3.08	4.36	4.93
Sin datos	7	7	7	7	7	8	8	8	6	6	5	6	4
Nº registros	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

ANEXO III: Grafico total de caudales (13150 datos) generados por el modelo

SWAT para las cuencas del Mashc3n y Chonta:



ANEXO IV: Mapas De Sequia Para La Cuenca Del Mashcón Y Chonta:

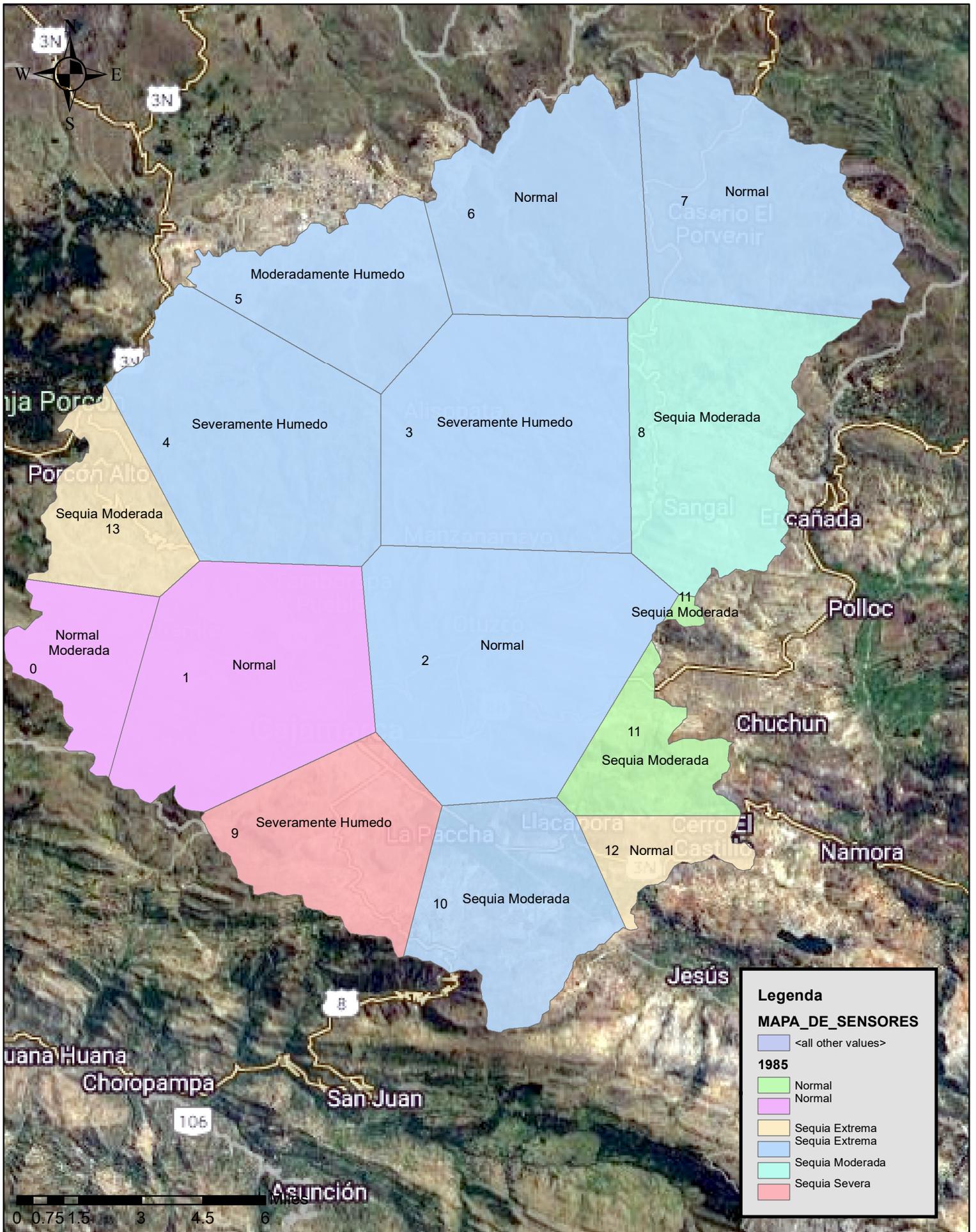


Legenda

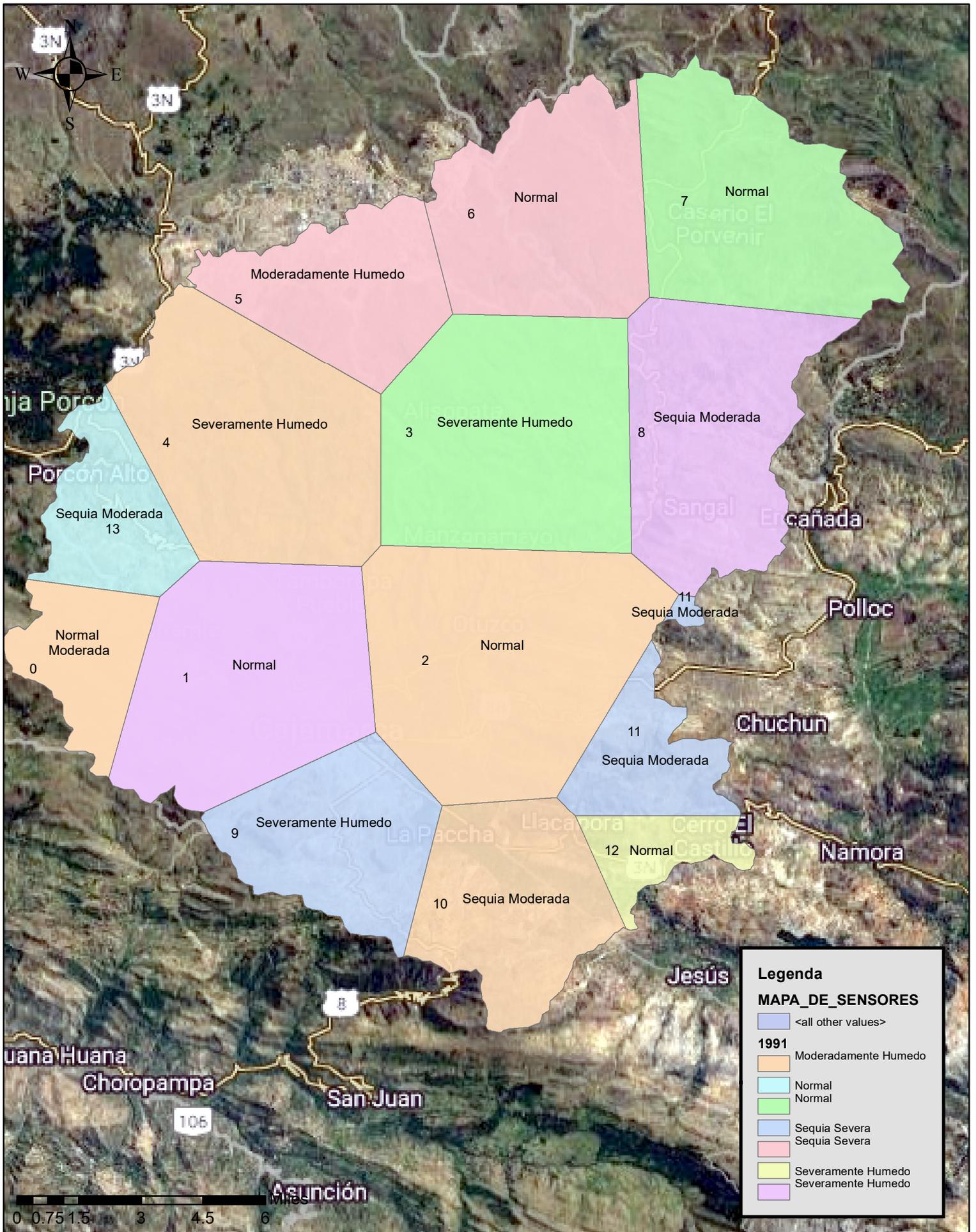
MAPA_DE_SENSORES

- <all other values>
- 1881**
- Moderadamente Humedo
- Normal
- Normal
- Normal Moderada
- Sequia Moderada
- Sequia Moderada
- Severamente Humedo

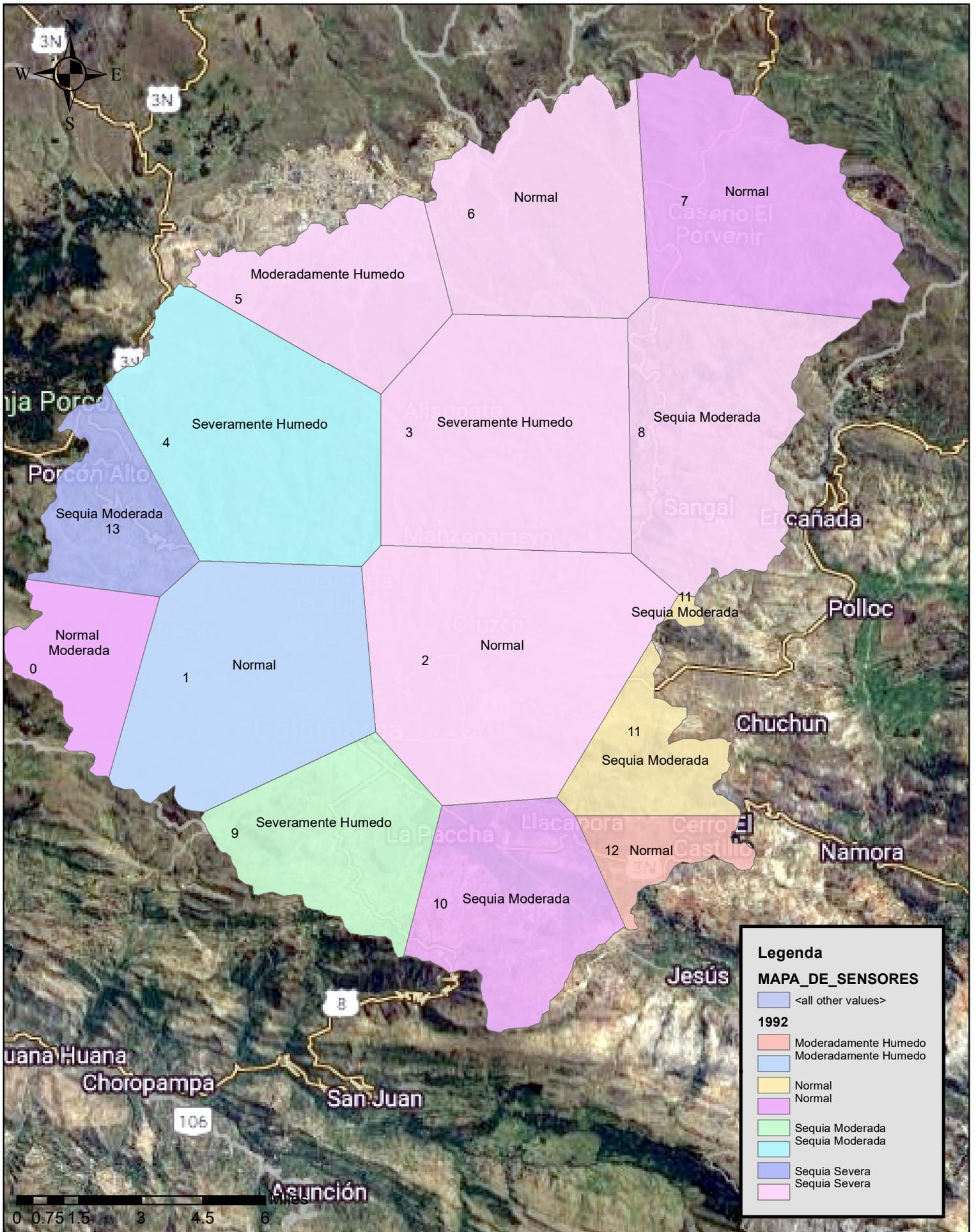
MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 1981



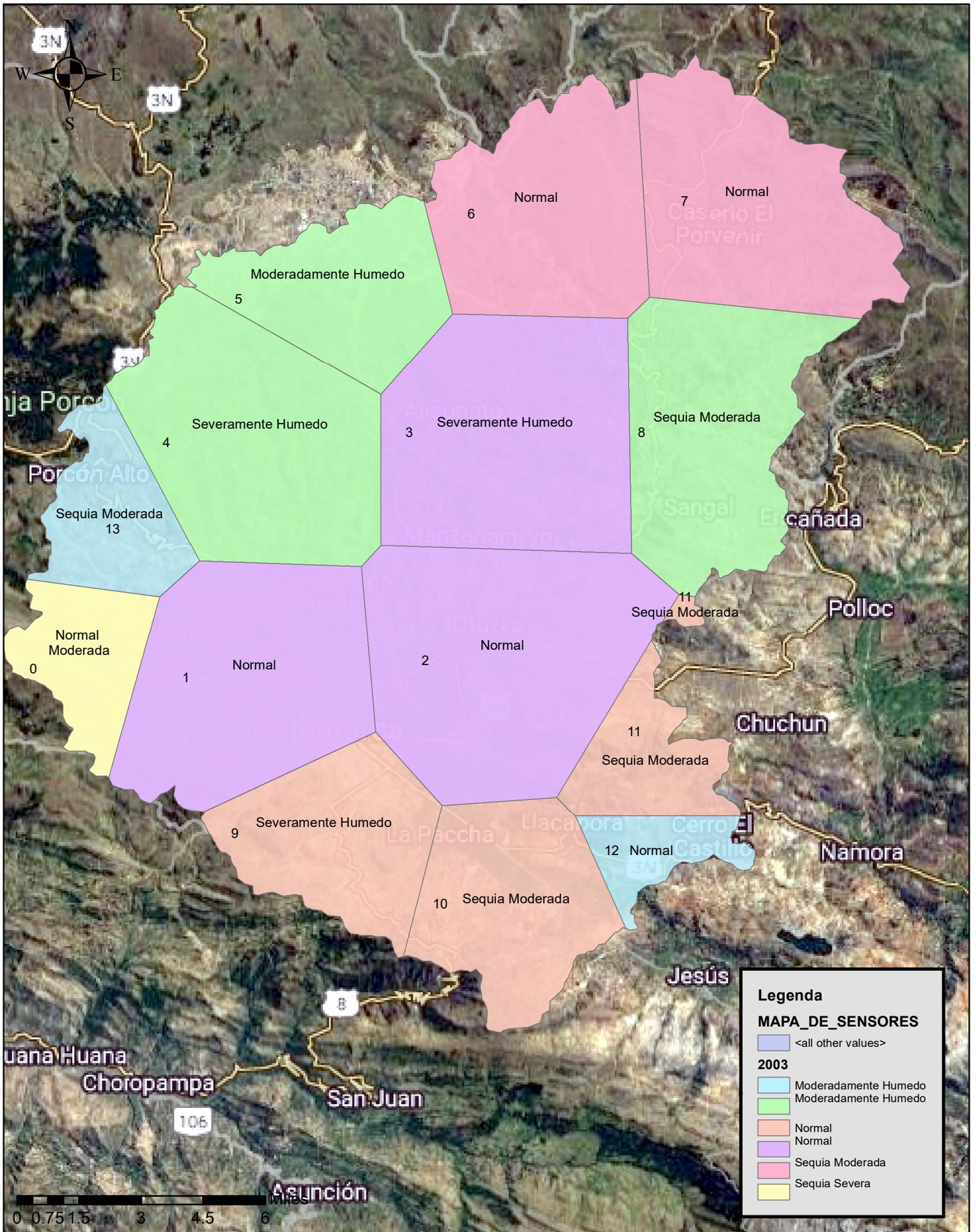
MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 1985



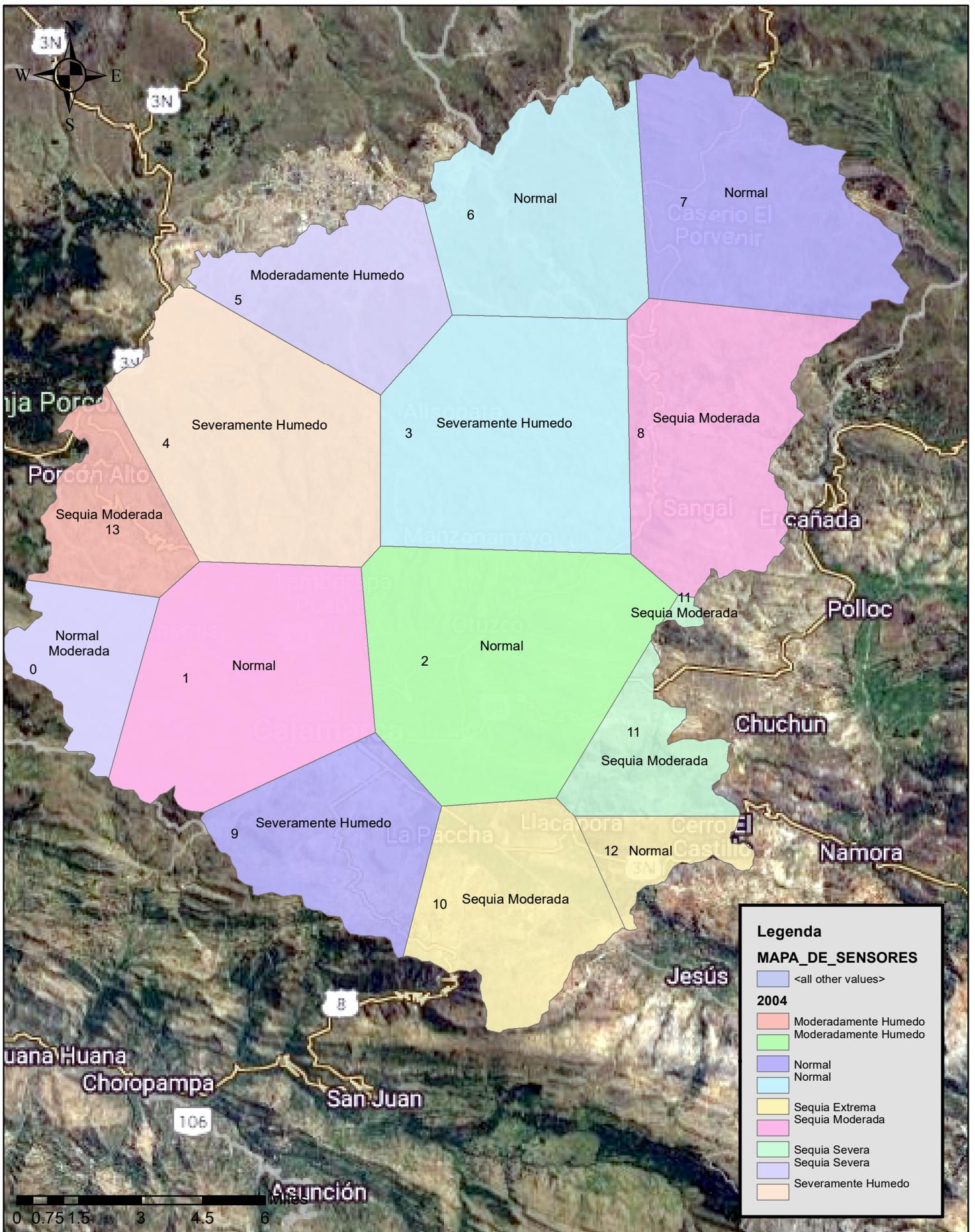
MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 1991



MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 1992



MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 2003



MAPA DE SEQUIAS SEGUN INDICE SPI DEL AÑO 2004

ANEXO V: Calculo de la demanda y oferta según el ANA:

Demanda y Oferta:

CUADRO DE OFERTA MENSUALIZADA TOTAL												
DESCRIPCIÓN:	MESES											
OFERTA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DIEMBRE
NºDIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
PORCENTAJE	85.00%	100.00%	90.00%	85.00%	80.00%	75.00%	70.00%	65.00%	65.00%	75.00%	75.00%	80.00%
OFERTA L/S	756.209	1106.370	1380.470	1372.699	870.725	419.792	128.368	27.128	42.491	237.352	434.922	645.759
M3/DÍA	65336.47	95590.35	119272.64	118601.22	75230.62	36270.04	11090.98	2343.87	3671.26	20507.22	37577.24	55793.56
TOTAL M3/MES	2025430.46	2676529.91	3697451.71	3558036.74	2332149.10	1088101.18	343820.43	72659.91	110137.93	635723.70	1127317.11	1729600.34

2. DEMANDA HÍDRICA												
PERIODO DE DISEÑO:		20	años									

CUADRO DEMANDA DE AGUA PROYECTADA TOTAL												
DESCRIPCIÓN:	MESES											
OFERTA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DIEMBRE
NºDIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
L/S	6632.65	8195.58	8259.20	7836.76	9104.57	7972.70	8208.10	9241.61	9988.80	8195.06	9131.15	9275.67
M3/DÍA	571780	706515	712000	675583	784877	687301	707595	796691	861103	706471	787168	799627
TOTAL M3/MES	17725189	19782432	22071995	20267475	24331178	20619041	21935437	24697419	25833094	21900592	23615039	24788427

CUADRO BALANCE HÍDRICO TOTAL												
DESCRIPCIÓN:	MESES											
OFERTA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DIEMBRE
NºDIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
OFERTA TOTAL (L/S)	756.21	1106.37	1380.47	1372.70	870.72	419.79	128.37	27.13	42.49	237.35	434.92	645.76
OFERTA (M3/MES)	2025430.46	2676529.91	3697451.71	3558036.74	2332149.10	1088101.18	343820.43	72659.91	110137.93	635723.70	1127317.11	1729600.34
DEMANDA (M3/MES)	571780.30	706515.41	711999.85	675582.50	784876.71	687301.36	707594.76	796690.92	861103.14	706470.70	787167.95	799626.67
TOTAL OFERTA (M3/AÑO)	19396958.52											
TOTAL DEMANDA (M3/AÑO)	8796710.29											
TOTAL BALANCE HÍDRICO (M3/AÑO)	10600248.2											

ANEXO VI: PANEL FOTOGRAFICO:

Figura. 78: Vista panorámica de la cuenca del río Chonta



Figura. 79: Vista digitalizada del río Grande



Figura. 80: Vista del río Grande sector Captación el Milagro



Figura. 81: Vista del río Grande

