

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA CALIBRANDO EL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL EN LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL KM 105, URUBAMBA 2024

PRESENTADO POR:

BACH. ZARETH SILVA SALLO

BACH. TANIA TTITO PARDO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL.**

ASESOR:

MG. ING. GORKI FEDERICO ASCUE SALAS

CUSCO-PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:....."ANÁLISIS DE LA
RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA CALIBRANDO EL MODELO
SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL EN LA ESTACION HIDROMÉTRICA
DEL KM 105, URUBAMBA 2024"

presentado por: **ZARETH SILVA SALLO** con DNI Nro.: **73125188** presentado
por: **TANIA TTITO PARDO** con DNI Nro.: **76847633** para optar el
título profesional/grado académico de **INGENIERO CIVIL**

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por **02** veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la**
UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de **08** %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o
título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, **27** de **JUNIO** de 20**25**

Firma

Post firma **GORKI FEDERICO ASCUE SALAS**

Nro. de DNI **24484766**

ORCID del Asesor **0000-0002-4477-7132**

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: **27259:470202005**

ZARETH SILVA SALLO - TANIA TTITO PARDO

TESIS FINAL TANIA_ZARETH TURNITIN 2.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:470202005

Fecha de entrega

27 jun 2025, 9:54 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

27 jun 2025, 10:00 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS FINAL TANIA_ZARETH TURNITIN 2.pdf

Tamaño de archivo

10.1 MB

216 Páginas

37.211 Palabras

186.637 Caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Dedicado a Dios, por iluminar y acompañarme en cada paso; a mis padres, por ser mi suelo firme y mi ejemplo de lucha; a mi hermana, mi mayor inspiración y apoyo incondicional; a mi familia, que me enseñó que el amor es la mejor herencia. A Negrita, cuyos ojos brillantes siguen guiándome desde las estrellas y a Tita, mi compañera de noches en vela, ellas me enseñaron que la felicidad cabe en un ronroneo. Y, por último y no menos importante, a la mujer que no se rindió, la que luchó contra el tiempo, la que aprendió a levantarse; por la niña que un día soñó con llegar aquí, hoy puedo decir: “Lo logré”.

Zareth Silva Sallo

A mi madre, quien con su amor incondicional me enseñó a creer en mí misma y a luchar por mis sueños. A mi hermano y a mis hermanas, por su constante apoyo y compañía en cada paso del camino. A mi papá, cuyo legado y presencia aún me acompañan, recordándome la fuerza y el amor que dejó en mi vida. A mi familia, por estar presentes en los momentos más importantes, brindándome su cariño y respaldo. A mis mejores amigas Zareth y Maylee, con quienes compartí risas, desafíos y grandes momentos que hicieron que esta etapa universitaria fuera inolvidable.

Tania Tito Pardo

Agradecimientos

Si algo hemos aprendido en este camino, es que los logros nunca son solitarios: están tejidos con la paciencia de otros, la sabiduría de quienes guían y el amor de quienes esperan.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

Agradecemos a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil, por su formación, exigencia académica y enseñanzas que han sido pilares en nuestra preparación profesional. Con ellos compartimos varios cursos a lo largo de la carrera, y de cada uno recibimos conocimientos y experiencias invaluable que, sin duda, serán de gran utilidad en nuestra futura vida profesional.

Agradecemos también a la empresa EGEMSA, por la disponibilidad de información brindada y por facilitar datos fundamentales para el desarrollo y validación de nuestra investigación.

Expresamos nuestra gratitud al Mg. Ing. Gorki Federico Ascue Salas, asesor de tesis, por su constante orientación, paciencia y compromiso durante todo el proceso de elaboración de este trabajo.

A los docentes Dr. Ing. Edwin Astete Samanez e Ing. Rómulo Rivera Quiroga, dictaminantes de tesis, por sus observaciones, comentarios y sugerencias valiosas que contribuyeron a mejorar la calidad del presente estudio y también a nuestros replicantes Msc. Ing. Sandro Virgilio Gutiérrez Samanez y al Ing. Carlos Hugo Loaiza Schiaffino por su

acompañamiento en la etapa final de este proceso. Su apoyo nos permitió culminar de manera óptima esta etapa académica.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Ing. Gary Chota Loayza, asesor externo, por sus aportes técnicos, tiempo y experiencia que enriquecieron significativamente nuestra investigación.

Agradecemos profundamente a nuestras familias, por su apoyo incondicional, motivación constante y confianza en cada paso de nuestra formación profesional.

Finalmente, nos agradecemos mutuamente por el trabajo en equipo, la dedicación compartida y el esfuerzo constante que nos permitió culminar con éxito esta etapa de nuestra vida universitaria.

Las autoras

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xxv
ABSTRACT.....	xxvii
INTRODUCCIÓN	xxix
Capítulo I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Situación problemática.....	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general.	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3 Objetivos de la investigación	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones de la investigación	6
1.6 Delimitación de la investigación	7
1.6.1 Delimitación Espacial.....	7
1.6.2 Delimitación Temporal.....	10
Capítulo II: Marco Teórico	12

2.1 Antecedentes de la investigación	12
2.1.1 Antecedentes Internacionales.	12
2.1.2 Antecedentes Nacionales.	13
2.1.3 Antecedentes Locales	15
2.2 Bases teóricas	17
2.2.1 Precipitación	17
2.2.1.1 Caudales generados por el modelo SWAT	17
2.2.2 Escorrentía	18
2.2.2.1 Caudales registrados en la estación hidrométrica del KM-105, Urubamba.....	18
2.2.3 Relación precipitación-escorrentía	19
2.2.3.1 Relación entre los caudales generados por el modelo SWAT y los caudales registrados	20
2.3 Marco conceptual.	20
2.3.1 Caudal	20
2.3.1.1 Caudales Máximos	21
2.3.2 Hidrogramas	22
2.3.3 Estación Hidrométrica	22
2.3.4 Precipitación media mensual	23
2.3.5 Precipitación media anual.....	24
2.3.6 Relación entre caudales	24

2.3.7 Ciclo Hidrológico	25
2.3.8 Sistemas	27
2.3.9 Modelos hidrológicos	29
2.3.9.1 Tipos de modelos hidrológicos	29
2.3.16 Modelo Digital de Elevación	34
2.3.17 Cobertura vegetal- Uso de suelo.....	34
2.3.18 Número de Curva (CN)	39
2.3.18.1 Grupo hidrológico del suelo.....	40
2.3.19 Tipo de suelo	42
2.3.20 Mapa de pendientes	43
2.3.21 Precipitación	45
2.3.22 Temperatura máxima y mínima.....	45
2.3.23 Resolución de imágenes satelitales.....	46
2.3.23.1 Resolución espacial.....	46
2.3.23.2 Resolución temporal	46
2.3.23.3 Resolución espectral	47
2.3.23.4 Resolución radiométrica	47
2.3.24 Codificación de cuencas (Sistema Pfafstetter)	48
2.3.25 Cuenca hidrográfica.....	51

2.3.25.1 Parámetros fisiográficos.....	51
2.3.25.2 Parámetros geomorfológicos	55
2.3.26 Producto Pisco	62
2.3.27 Otros softwares	63
2.3.28 Variables climáticas para la calibración del modelo SWAT	64
2.3.29 Procesos Hidrológicos y Modelación de la Escorrentía en SWAT	66
2.3.30.1 Comportamiento de la precipitación en altura	66
2.3.30.2 Balance hídrico en SWAT	67
2.3.30 Cálculo de Escorrentía Superficial (Método SCS-CN)	68
2.3.31 Modelación del deshielo en SWAT	70
2.3.31.1 Impacto del deshielo en la escorrentía de la Cuenca de estudio	71
2.3.32 Análisis estadístico para modelos hidrológicos	72
2.3.32.1 Relación precipitación-escorrentía.....	72
2.3.32.2 Análisis de frecuencia hidrológica.....	72
2.3.32.3 Amplitud de clases	73
2.3.32.4 Formas de distribución: unimodal y bimodal	74
2.3.32.5 Análisis de correlación entre variables hidrológicas	74
2.3.32.6 Indicadores de desempeño del modelo hidrológico.....	75
2.3.32.7 Aplicación del software Statgraphics.....	76

2.4 Hipótesis.....	77
2.4.1 Hipótesis General.	77
2.4.2 Hipótesis Específicas.	77
2.5 Identificación de Variables e indicadores	78
Capítulo III: METODOLOGÍA	79
3.1 Tipo de investigación	79
3.2 Diseño de la investigación	79
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	80
3.3.1 Obtención de datos de entrada.....	80
3.3.1.1 Información cartográfica.....	80
3.3.1.2 Información de Mapa de suelos	82
3.3.1.3 Información de Mapa de uso de suelos.....	84
3.3.1.4 Información Hidrológica.....	86
3.3.1.4.1 Análisis de consistencia de los datos de entrada de datos climáticos	87
3.3.2 Softwares utilizados.....	89
3.3.3 Flujograma de la investigación.....	92
3.4 Metodología de procesamiento de datos	93
3.4.1 Determinación del Modelo digital de elevación.....	93
3.4.2 Determinación del uso y tipo de suelo.....	95

3.4.3. Determinación de datos climatológicos.....	106
3.5 Salida de datos de simulación del modelo	112
3.6 Preparación antes de la calibración y validación.	114
3.6.1 Naturalización de Caudales	114
3.6.2 Calibración y Validación	117
3.7 Metodología para determinar el grado de correlación de la precipitación - escorrentía	122
Capítulo IV: Resultados.....	124
4.1. Parámetros de la cuenca de estudio.....	124
4.1.1 Generalidades.	124
4.1.2 Determinación de los parámetros fisiográficos.	124
4.1.2.1 Área (A)	124
4.1.2.2 Perímetro (P).....	127
4.1.2.3. Longitud axial de la cuenca (La)	127
4.1.3. Determinación de los parámetros geomorfológicos.	128
4.1.3.1. Curva hipsométrica	128
4.1.3.2. Polígono de frecuencia de altitudes	129
4.1.3.3. Altitud media de la cuenca (Hm)	130
4.1.3.4. Rectángulo Equivalente	130
4.1.4. Determinación de los parámetros de drenaje.....	131

4.1.4.1. Grado de ramificación.....	131
4.1.4.2. Densidad de drenaje (Dd)	131
4.1.4.3. Densidad de corrientes (Dc).....	131
4.1.4.4. Extensión media de escurrimiento (Es)	131
4.1.4.5 Resumen de los parámetros de la cuenca de estudio.	131
4.2 Determinación de uso y tipo de suelo en la cuenca de estudio	132
4.2.1. Uso y tipo de suelo en la cuenca de estudio.	133
4.3 Datos de entrada climáticas.....	135
4.3.1 Estaciones meteorológicas.....	135
4.3.1.1 Precipitación	135
4.3.1.2 Temperatura	142
4.3.2 Modelo esquemático.....	153
4.3.3 Calibración y validación del modelo.	154
4.3.3.1 Escenario 1.....	154
4.3.3.2 Escenario 2.....	158
4.3.3.3 Escenario 3.....	161
4.3.3.4 Escenario 4.....	164
4.3.3.5 Escenario 5.....	167
4.4 Determinación del grado de correlación entre los caudales generados y simulados ...	173

4.4.1 Evaluación de la correlación y ajuste del modelo.	173
5.4.1.1 Coeficiente de determinación (R^2)	173
4.4.1.2 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS).....	174
4.4.1.3 Sesgo de porcentaje medio (PBIAS).....	174
4.4.1.4 Índice de Kling-Gupta (KGE).....	174
4.4.2 Parámetros estadísticos y rangos de aceptabilidad.	174
4.5 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales observados y caudales simulados	176
5.5.1 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales observados	176
4.5.2 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales simulados.....	185
4.5.2 Análisis de la correlación entre los caudales observados y caudales simulados ...	192
Capítulo V: Discusión de resultados.....	197
CONCLUSIONES	201
RECOMENDACIONES.....	204
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	205
ANEXOS	210

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Provincias y distritos dentro de la cuenca de estudio</i>	9
Tabla 2. <i>Valores de número de curva según grupo hidrológico y cobertura</i>	40
Tabla 3. <i>Descripción de suelos</i>	41
Tabla 4. <i>Intervalos representativos, asociados a las geoformas principales</i>	43
Tabla 5. <i>Clases de forma según rango de valores de Ff</i>	53
Tabla 6. <i>Clasificación de cuencas según el índice de compacidad.</i>	54
Tabla 7. <i>Clases según rangos de densidad de drenaje.</i>	61
Tabla 8 <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	78
Tabla 9. <i>Tipo de dato, resolución y fuente de datos</i>	86
Tabla 10. <i>Softwares utilizados</i>	89
Tabla 11. <i>Equivalencias de uso de suelos entre ambos sistemas</i>	100
Tabla 12. <i>Equivalencias de tipos de suelos entre ambos sistemas</i>	102
Tabla 13. <i>Rangos de pendientes</i>	105
Tabla 14. <i>Parámetros del escenario 1</i>	120
Tabla 15. <i>Parámetros del escenario 2</i>	121
Tabla 16. <i>Parámetros del escenario 3</i>	122
Tabla 17. <i>Área de las subcuencas</i>	125
Tabla 18. <i>Perímetro de las subcuencas</i>	127

Tabla 19. <i>Resumen de los parámetros de la cuenca</i>	132
Tabla 20. <i>Porcentaje de tipo de suelo de la cuenca de estudio</i>	133
Tabla 21. <i>Porcentaje de uso de suelo de la cuenca de estudio</i>	134
Tabla 22. <i>Ubicación de las 19 estaciones generadas por el producto PISCO</i>	136
Tabla 23. <i>Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 01, 02, 03, 04, 05</i>	136
Tabla 24. <i>Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 06, 07, 08, 09, 10</i>	137
Tabla 25. <i>Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15</i>	138
Tabla 26. <i>Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19</i>	139
Tabla 27. <i>Temperatura máxima y mínima por el producto PISCO</i>	142
Tabla 28. <i>Temperatura máxima anual de los años 1981-2016 de las estaciones 01, 02, 03, 04, 05</i>	143
Tabla 29. <i>Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 06, 07, 08, 09, 10</i>	144
Tabla 30. <i>Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15</i>	145
Tabla 31. <i>Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19</i>	146
Tabla 32. <i>Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 1, 2, 3, 4, 5</i>	148
Tabla 33. <i>Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 6, 7, 8, 9, 10</i>	149

Tabla 34. <i>Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15.</i>	150
Tabla 35. <i>Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19.</i>	151
Tabla 36. <i>Parámetros utilizados en el escenario 1</i>	154
Tabla 37. <i>Indicadores estadísticos en la calibración ante el escenario 1</i>	155
Tabla 38. <i>Indicadores estadísticos en la validación ante el escenario 1.</i>	155
Tabla 39. <i>Parámetros utilizados por el informe del SENAMHI</i>	158
Tabla 40. <i>Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 2.</i>	158
Tabla 41. <i>Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 2.</i>	159
Tabla 42. <i>Parámetros utilizados en el escenario 3.</i>	161
Tabla 43. <i>Resultados de los indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 3.</i>	162
Tabla 44. <i>Resultados de los indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 3.</i>	162
Tabla 45. <i>Parámetros utilizados en el escenario 4.</i>	164
Tabla 46. <i>Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 4.</i>	165
Tabla 47. <i>Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 4.</i>	165
Tabla 48. <i>Parámetros utilizados en el escenario 5.</i>	168
Tabla 49. <i>Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 5.</i>	169
Tabla 50. <i>Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 5.</i>	169
Tabla 51. <i>Resumen de resultados según los escenarios.</i>	171

Tabla 52. Rangos de aceptabilidad del R^2	171
Tabla 53. Rangos aceptabilidad del NS.....	171
Tabla 54. Rangos de aceptabilidad PBIAS.....	172
Tabla 55. Rangos de aceptabilidad de KGE.....	172
Tabla 56. Resumen de resultados.....	173
Tabla 57. Resultados de parámetros estadísticos y rangos de aceptabilidad	174
Tabla 58. Promedio anual de caudales máximos y mínimos observados.....	176
Tabla 59. Promedio histórico anual de caudales de la estación hidrométrica del km 105..	177
Tabla 60. Datos promedio de caudales mensuales del año 1984-1999.....	178
Tabla 61. Datos promedio de caudales mensuales del año 2000-2016.....	179
Tabla 62. Resumen estadístico para Caudales Observados	180
Tabla 63. Caudales máximos y mínimo por año.....	185
Tabla 64. Caudal máximo y mínimo promedio.....	186
Tabla 65. Caudales medios simulados 1984- 1994 Periodo de calibración	186
Tabla 66. Caudales medios simulados 1995- 2005 Periodo de calibración	187
Tabla 67. Caudales medios simulados 2006- 2016 Periodo de validación.....	187
Tabla 68. Resumen estadístico para Caudales Observados	188
Tabla 69. Resumen Estadístico	192
Tabla 70. Clases de forma según rango de valores de F_f	225

Tabla 71. <i>Cálculo de la curva hipsométrica</i>	226
Tabla 72. <i>Cálculo de la altitud media de la cuenca</i>	226
Tabla 73. <i>Ordenes de ríos</i>	227

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ubicación geográfica y política de la cuenca Vilcanota-Urubamba</i>	7
Figura 2. <i>Ubicación geográfica y política de la cuenca de estudio</i>	8
Figura 3. <i>Ciclo del agua</i>	27
Figura 4. <i>Ejemplo de los tres grados de desratización para una cuenca hidrográfica</i>	32
Figura 5. <i>Clasificación de modelos hidrológicos</i>	33
Figura 6. <i>Tipos de Curvas Hipsométrica según la edad del rio.</i>	56
Figura 7. <i>Ordenes de ríos según Strahler</i>	59
Figura 8. <i>Representación esquemática del concepto del balance hidrológico SWAT</i>	65
Figura 9. <i>Servidor Earth Data</i>	81
Figura 10. <i>DEM de la cuenca Vilcanota-Urubamba</i>	82
Figura 11. <i>Portal de suelos de la FAO</i>	84
Figura 12. <i>Página de global land cover</i>	85
Figura 13. <i>DEM de 30m</i>	93
Figura 14. <i>Delimitación de la cuenca de estudio</i>	95
Figura 15. <i>Punto de aforo</i>	97
Figura 16. <i>Mapa de uso de suelos</i>	98
Figura 17. <i>Mapa de suelos con la tabla de reclasificación de la nomenclatura</i>	98
Figura 18. <i>Mapa de suelos</i>	99

Figura 19. <i>Mapa de uso suelos con la tabla de reclasificación de la nomenclatura</i>	99
Figura 20. <i>Uso de suelo</i>	101
Figura 21. <i>Tipos de Suelo FAO</i>	103
Figura 22. <i>Mapa de pendientes</i>	104
Figura 23. <i>Aplicación de umbrales de exclusión</i>	106
Figura 24. <i>Interfaz del software R</i>	107
Figura 25. <i>Script insertado al programa R para su ejecución</i>	108
Figura 26. <i>Visualización de la cuenca de estudio en la interfaz de R</i>	109
Figura 27. <i>Configuración de datos para simulación</i>	110
Figura 28. <i>Ejecución de la simulación</i>	111
Figura 29. <i>Caudales simulados</i>	113
Figura 30. <i>Interface de SWAT-CUP</i>	116
Figura 31. <i>Calibración del modelo</i>	118
Figura 32. <i>Inicio de simulaciones de la calibración</i>	119
Figura 33. <i>Finalización de las simulaciones de la calibración</i>	119
Figura 34. <i>Diagrama del área en km² de las 19 subcuencas de la cuenca de estudio</i>	126
Figura 35. <i>Diagrama del área en % de las 19 subcuencas de la cuenca de estudio</i>	126
Figura 36. <i>Curva hipsométrica</i>	129
Figura 37. <i>Polígono de frecuencia de altitudes</i>	130

Figura 38. <i>Grafico del porcentaje del tipo de suelo en la cuenca de estudio</i>	134
Figura 39. <i>Grafico del porcentaje del uso de suelo en la cuenca de estudio</i>	135
Figura 40. <i>Histograma de precipitación media anual de las 19 estaciones del año 1981-2016</i>	141
Figura 41. <i>Diagrama de precipitación media anual las 19 estaciones de los años de 1981-2016</i>	141
Figura 42. <i>Temperatura máxima media anual de las 19 estaciones hidrométricas</i>	147
Figura 43. <i>Temperatura máxima media anual de las 19 estaciones hidrométricas.</i>	147
Figura 44. <i>Histograma de la temperatura mínima media anual de las 19 estaciones hidrométricas</i>	152
Figura 45. <i>Diagrama de temperatura mínima media anual de las 19 estaciones hidrométricas</i>	152
Figura 46. <i>Modelo esquemático de la cuenca de estudio</i>	153
Figura 47. <i>Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 1.</i>	156
Figura 48. <i>Mejores resultados de los parámetros ante el escenario 1.</i>	157
Figura 49. <i>Correlación de caudales ante el escenario 1.</i>	157
Figura 50. <i>Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 2.</i>	159
Figura 51. <i>Mejores resultados ante el escenario 2.</i>	160
Figura 52. <i>Correlación de caudales ante el escenario 2.</i>	160
Figura 53. <i>Mejores resultados de los parámetros ante el escenario 3.</i>	162
Figura 54. <i>Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 3.</i>	163

Figura 55. <i>Correlación de los caudales ante el escenario 3.</i>	163
Figura 56. <i>Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 4.</i>	166
Figura 57, <i>Mejores resultados ante el escenario 4.</i>	166
Figura 58. <i>Correlación de los caudales ante el escenario 4.</i>	167
Figura 59. <i>Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 5.</i>	169
Figura 60, <i>Mejores resultados ante el escenario 5.</i>	170
Figura 61. <i>Correlación de los caudales ante el escenario 5.</i>	170
Figura 62. <i>Caudales simulados vs Caudales observados ante el mejor escenario</i>	175
Figura 63. <i>Interfaz del software STATGRAPHICS</i>	180
Figura 64. <i>Tabla de frecuencias para Caudales Observados</i>	182
Figura 65. <i>Gráfico de Dispersión - Caudales observados</i>	183
Figura 66. <i>Gráfico de caja y bigotes</i>	183
Figura 67. <i>Histograma de Frecuencia - Caudales observados</i>	184
Figura 68. <i>Tabla de frecuencia para Caudales Simulados</i>	190
Figura 69. <i>Gráfico de dispersión - Caudales simulados</i>	190
Figura 70. <i>Gráfico de caja y bigotes - Caudales simulados</i>	191
Figura 71. <i>Histograma de Frecuencia - Caudales simulados</i>	192
Figura 72. <i>Regresión simple - Caudales simulados vs Caudales observados</i>	193
Figura 73. <i>Gráfico del modelo ajustado</i>	195

Figura 74. <i>Gráfico de caja y bigotes</i>	195
Figura 75. <i>Frecuencia vs Caudales</i>	196

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. <i>Matriz de consistencia</i>	212
Anexo 2. <i>Solicitud de acceso a la información pública EGEMSA</i>	215
Anexo 3. <i>Mesa de partes</i>	216
Anexo 4. <i>Cargo de expediente de entrega de información.</i>	217
Anexo 5. <i>Solicitud de información de registro de caudales</i>	218
Anexo 6. <i>Información de caudales históricos 1981-2024</i>	219
Anexo 7. <i>Comportamiento del caudal del rio Vilcanota del 2015-2019</i>	220
Anexo 8. <i>Comportamiento del caudal del rio Vilcanota del 2012 al 2017</i>	220
Anexo 9. <i>Comportamiento del caudal del rio Vilcanota del 2011 al 2018</i>	221
Anexo 10. <i>Volumen almacenado y caudal descargado de la represa de Sibinacocha del 2004-2009</i>	221
Anexo 11. <i>Volumen almacenado y caudal descargado de la represa de Sibinacocha del 2014-2018</i>	222
Anexo 12. <i>Caudales estación de aforos km 105 del rio Vilcanota</i>	222

INDICE DE PLANOS DE LA CUENCA DE ESTUDIO

Plano 1. <i>Ubicación de la cuenca de estudio</i>	231
Plano 2. <i>Tipo de suelo de la cuenca de estudio</i>	232
Plano 3. <i>Uso de suelos de la cuenca de estudio</i>	233
Plano 4. <i>Método de PFAFSTETTER cuenca-río Pachar</i>	234

RESUMEN

La relación precipitación-escorrentía es un eje fundamental para la gestión sostenible de cuencas hidrográficas, especialmente en regiones andinas como la cuenca de estudio, donde la variabilidad climática y los cambios de uso de suelo desafían la planificación hídrica. El presente estudio titulado "Análisis de la Relación Precipitación-Escorrentía Calibrando el Modelo Soil and Water Assessment Tool en la Estación Hidrométrica del km 105, Urubamba 2024" tiene como objetivo principal determinar la relación entre la precipitación y la escorrentía en la cuenca de estudio, a través de la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT, con el fin de generar un marco predictivo robusto que contribuya al buen manejo de recursos hídricos y/o mitigación de riesgos hidrológicos en la zona.

Para lograr esto, se implementó una metodología basada en el procesamiento de datos hidrometeorológicos, edáficos y de cobertura vegetal. Inicialmente se recopilieron series históricas de precipitación, temperatura y caudales medidos en la estación hidrométrica Lucumachayoc (km 105). Luego se construyó un modelo SWAT utilizando un DEM de 30 m de resolución, mapas de suelo y uso de suelo. La calibración se realizó con el algoritmo SUFI-2 en SWAT-CUP, ajustando parámetros clave como el número de curva (CN), coeficiente de escurrimiento superficial, tiempo de concentración, etc. Se validó el modelo con datos independientes, aplicando índices de desempeño para garantizar su confiabilidad.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo SWAT calibrado representa de manera muy óptima la dinámica hidrológica de la cuenca, con un R^2 de 0.81, lo que indica una fuerte relación entre los valores simulados y observados. Además, el NS de 0.71 y el KGE de 0.65 reflejan una buena capacidad predictiva del modelo, especialmente en la simulación de

caudales bajos y eventos extremos. Por otro lado, el PBIAS de 22.4% los valores obtenidos son aceptables dentro de los estándares de evaluación hidrológica.

Palabras claves: Caudales generados, Caudales registrados, Relación, Calibración, Validación, Cuenca, Estación hidrométrica km 105, frecuencia, amplitud.

ABSTRACT

The precipitation-runoff relationship is a fundamental pillar for sustainable watershed management, especially in Andean regions such as the study basin, where climate variability and land-use changes challenge water planning. The main objective of this study, entitled "Analysis of the Precipitation-Runoff Relationship by Calibrating the Soil and Water Assessment Tool Model at the Km 105 Hydrometric Station, Urubamba 2024," is to determine the relationship between precipitation and runoff in the study basin through the calibration and validation of the SWAT hydrological model. This is intended to generate a robust predictive framework that contributes to sound water resource management and/or hydrological risk mitigation in the area.

To achieve this, a methodology based on the processing of hydrometeorological, soil, and vegetation cover data was implemented. Initially, historical series of precipitation, temperature, and flow measurements were collected at the Lucumachayoc hydrometric station (km 105). A SWAT model was then constructed using a 30-m resolution DEM, soil, and land-use maps. Calibration was performed using the SUFI-2 algorithm in SWAT-CUP, adjusting key parameters such as the curve number (CN), surface runoff coefficient, time of concentration, and so on. The model was validated with independent data, applying performance indices to ensure its reliability.

The results obtained show that the calibrated SWAT model optimally represents the hydrological dynamics of the basin, with an R^2 of 0.81, indicating a strong relationship between simulated and observed values. Furthermore, the NS of 0.71 and the KGE of 0.65 reflect the model's good predictive capacity, especially in simulating low flows and extreme events. On

the other hand, the PBIAS of 22.4% the values obtained are acceptable within the hydrological evaluation standard.

Keywords: Generated flows, Recorded flows, Relationship, Calibration, Validation, Basin, Hydrometric station km 105, frequency, amplitude.

INTRODUCCIÓN

Comprender la relación precipitación-escorrentía se vuelve fundamental para predecir la disponibilidad hídrica y mitigar riesgos ambientales. En la cuenca Vilcanota - Urubamba, específicamente en la estación hidrométrica del km 105, la variabilidad de caudales y la escasez de datos precisos limitan la capacidad para anticipar eventos extremos, como sequías o inundaciones. El capítulo I identifica las brechas en la modelación hidrológica local, destacando la necesidad de calibrar herramientas robustas como el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para mejorar la toma de decisiones en gestión de recursos hídricos bajo condiciones climáticas cambiantes.

El capítulo II nos habla del modelo SWAT, que emerge como un estándar en hidrología debido a su capacidad para simular balances hídricos en cuencas complejas, integrando variables climáticas, edáficas y topográficas. Este capítulo revisa conceptos clave como el número de curva (CN), el retraso en flujo subterráneo (GW_DELAY) y el factor de base de flujo subterráneo (ALPHA_BF), parámetros cuya calibración determina la precisión del modelo.

La hipótesis central descrito en el capítulo III propone que la calibración automatizada del modelo SWAT, mediante herramientas como SWAT-CUP, mejora significativamente la precisión en la estimación de caudales en la estación km 105. Las variables críticas incluyen parámetros hidrológicos (CN, GW_DELAY, ALPHA_BF, etc), datos de precipitación diaria y series de caudales observados. Este capítulo establece además las relaciones esperadas entre estas variables y su impacto en la reducción de incertidumbres, particularmente en regiones con limitaciones de datos.

El estudio adopta un enfoque cuantitativo que combina la recopilación de datos climáticos, propiedades edáficas y mediciones hidrométricas. En el capítulo IV menciona el procedimiento de la calibración, se realiza mediante SWAT-CUP, utilizando algoritmos de optimización como SUFI-2 para ajustar los parámetros sensibles. La validación emplea indicadores de desempeño (R^2 , NSE) y análisis de incertidumbre para evaluar la robustez del modelo. Adicionalmente, se incorpora un marco metodológico innovador para cuantificar errores sistemáticos asociados a la resolución espacial de los insumos.

Capítulo I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

En las regiones altoandinas del Perú, una de las principales problemáticas en la gestión de los recursos hídricos es la limitada comprensión de la relación entre la precipitación y la escorrentía, particularmente en cuencas complejas como la del río Vilcanota. Esta relación hidrológica se ve influenciada por múltiples factores de alta variabilidad espacial y temporal, como la infiltración, la evapotranspiración, el uso del suelo y las características físicas del terreno. En la estación hidrométrica del km 105 del río Urubamba, que constituye un punto estratégico para el monitoreo del comportamiento fluvial, no se cuenta con estudios actualizados que integren estas variables de manera precisa en un modelo numérico, lo que dificulta la estimación confiable de caudales y limita la capacidad de anticipar eventos extremos como crecidas o sequías. Aunque el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) se ha consolidado a nivel internacional como una herramienta robusta para simular procesos hidrológicos a escala de cuenca, su aplicación en este sector de la cuenca del Vilcanota aún presenta desafíos importantes.

A nivel nacional, el Perú enfrenta importantes retos en la modelación hidrológica de sus cuencas, como lo señala la Autoridad Nacional del Agua, que resalta la necesidad de fortalecer las capacidades técnicas e incorporar modelos predictivos confiables en la planificación de los recursos hídricos. En regiones como Cusco, la variabilidad climática y la topografía accidentada complican aún más esta labor, generando incertidumbre sobre los patrones de escorrentía. Investigaciones regionales han demostrado que la escorrentía en el río Vilcanota se ve afectada por múltiples factores, entre ellos la cobertura vegetal, la variabilidad

pluviométrica y las intervenciones humanas en el uso del suelo. A nivel internacional, el modelo SWAT ha sido utilizado exitosamente en múltiples estudios, desde Estados Unidos hasta Asia y África, para analizar procesos hidrológicos a escala de cuenca, demostrando su capacidad para simular con precisión los flujos de agua cuando se encuentra debidamente calibrado (Shrestha et al., 2017). También hay estudios que indican que la transferencia directa del modelo sin adecuación local puede generar resultados poco representativos, de allí la necesidad de desarrollar estudios que adapten, calibren y validen el modelo en contextos específicos como el de la cuenca del Vilcanota.

El principal síntoma que revela la existencia del problema es la discrepancia observable entre los caudales simulados por el modelo SWAT y los caudales efectivamente registrados en la estación hidrométrica del km 105. Esta falta de ajuste genera errores significativos en la estimación de los recursos hídricos disponibles, lo cual afecta la planificación de actividades agrícolas, hidroenergéticas, turísticas y de abastecimiento poblacional en la región. Entre las causas identificadas destacan la escasa densidad de estaciones hidrometeorológicas con series continuas y de calidad, así como la limitada adaptación de los parámetros del modelo SWAT a las condiciones locales de topografía, suelo, cobertura vegetal y prácticas de uso del agua. Además, la variabilidad climática y las intervenciones antrópicas como cambios de uso de suelo o construcción de infraestructura hidráulica (presa de Sibinacocha) alteran el comportamiento hidrológico de la cuenca. Las consecuencias de no abordar este problema incluyen una gestión ineficaz de los recursos hídricos, riesgos crecientes ante eventos extremos como sequías o inundaciones, y una baja capacidad de anticipación frente a escenarios de cambio climático, lo cual compromete la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la cuenca del Vilcanota.

Para enfrentar este problema, la presente tesis propone calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT utilizando datos reales de precipitación y caudal registrados en la estación hidrométrica del km 105, con el objetivo de analizar la correlación entre los caudales simulados y observados en el área de estudio. Esta propuesta busca generar una base técnica sólida que permita ajustar el modelo a las condiciones particulares de la cuenca, aumentando su precisión en la simulación de la esorrentía. Al establecer el grado de correlación mediante indicadores estadísticos como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el R^2 o el sesgo porcentual, se podrá evaluar el desempeño del modelo y su aplicabilidad en la planificación de los recursos hídricos locales. La información obtenida contribuirá a mejorar las herramientas de apoyo a la toma de decisiones, permitiendo a las autoridades competentes contar con simulaciones más realistas y confiables. Además, los resultados de este estudio pueden ser replicables en otras subcuencas de características similares, fomentando el uso de modelos calibrados en el contexto andino como instrumento técnico-científico para la gestión hídrica sostenible.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general.

P.G: ¿Cuál es la relación precipitación-esorrentía calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?

1.2.2 Problemas específicos

P.E.01: ¿Cómo es la amplitud y la frecuencia de los caudales generados por las precipitaciones aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?

P.E.02: ¿Cómo es la variación en amplitud y frecuencia de la esorrentía en los caudales registrados en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?

P.E.03: ¿Cuál es la correlación entre la precipitación y la esorrentía calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General.

O.G: Analizar la relación precipitación-esorrentía calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

1.3.2 Objetivos específicos.

O.E.01: Determinar la amplitud y frecuencia en los caudales generados por las precipitaciones aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

O.E.02: Determinar la variación en amplitud y frecuencia de la esorrentía en los caudales registrados en la estación hidrométrica del km 105 Urubamba 2024.

O.E.03: Determinar el grado de correlación entre la precipitación y la esorrentía, calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

1.4 Justificación

La gestión sostenible del agua es un desafío creciente en la cuenca Vilcanota-Urubamba, donde la variabilidad climática y la presión sobre los recursos hídricos afectan directamente la seguridad alimentaria y el bienestar de las comunidades locales. Sin embargo, la falta de información precisa sobre la dinámica hidrológica limita la toma de decisiones efectivas. (*Cusco*, s. f.)

Validar y ajustar el modelo SWAT con datos de la estación hidrométrica del km 105 permitirá generar estimaciones de caudal más confiables, fundamentales para planificar el uso agrícola, prevenir riesgos de inundaciones y diseñar estrategias de conservación. (*swat2005-tutorial-spanish.pdf*, s. f.)

Estudios previos han demostrado que la aplicación de modelos hidrológicos calibrados mejora significativamente la eficiencia en la gestión del agua y la formulación de políticas públicas. (Srivastava et al., 2025)

Aunque este trabajo no resolverá de manera inmediata todos los problemas de gestión hídrica, sí proporcionará una base científica sólida que facilitará la toma de decisiones informadas y la implementación de prácticas sostenibles en la cuenca.

Los resultados obtenidos constituyen una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en sectores estratégicos como la agricultura, ganadería y planificación territorial, al permitir una mejor estimación de la disponibilidad hídrica en escenarios actuales y futuros. Asimismo, este trabajo aporta al desarrollo de políticas de conservación del agua, y puede ser replicado en otras subcuencas con características similares, contribuyendo a la generación de

modelos ajustados a la realidad andina. De esta forma, se fortalece la capacidad institucional y técnica de los actores involucrados en la gestión hídrica local y regional, promoviendo un enfoque de manejo integrado del recurso. (*Proyecto de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Diez Cuencas (PGIRH) - Publicaciones*, s. f.)

1.5 Limitaciones de la investigación

El presente estudio se basa en el análisis de la relación precipitación–escorrentía utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con datos específicos y parámetros calibrados para la estación hidrométrica del km 105, Urubamba. Sin embargo, es importante aclarar que los resultados obtenidos están condicionados a las siguientes limitaciones:

Limitaciones computacionales: Dado que la cuenca de estudio posee una extensión considerable, fue necesario emplear una infraestructura computacional de mayor capacidad. Para la correcta ejecución del modelo y el procesamiento de los datos, se optó por alquilar un equipo con recursos suficientes para manejar la complejidad del sistema hidrológico modelado.

Limitaciones en la capacitación sobre SWAT: La disponibilidad de material didáctico en línea sobre la implementación y calibración del modelo SWAT es limitada, lo que dificultó el proceso de aprendizaje. Para suplir esta carencia, se requirió recurrir a asesorías especializadas y formación particular en el uso y manejo del software, incrementando el tiempo de implementación del estudio.

A pesar de estas limitaciones, el estudio proporciona una base sólida para comprender la recepción precipitación–escorrentía en la zona de estudio y puede servir como referencia para futuras investigaciones que busquen mejorar la precisión del modelo SWAT.

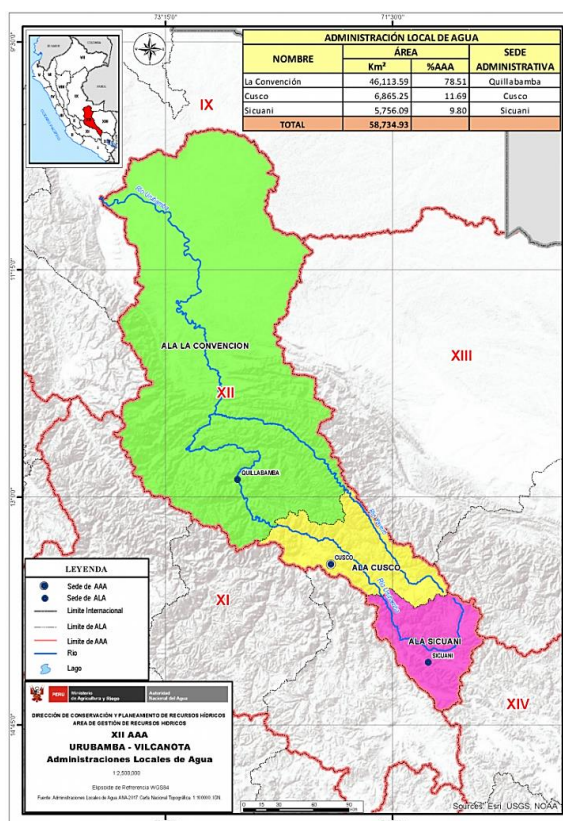
1.6 Delimitación de la investigación

1.6.1 Delimitación Espacial.

La zona de estudio es la cuenca Vilcanota - Urubamba hasta la estación hidrométrica de EGEMSA, Lucumachayoc ubicada en el Km 105 de la vía férrea Cusco - Machupicchu.

Figura 1.

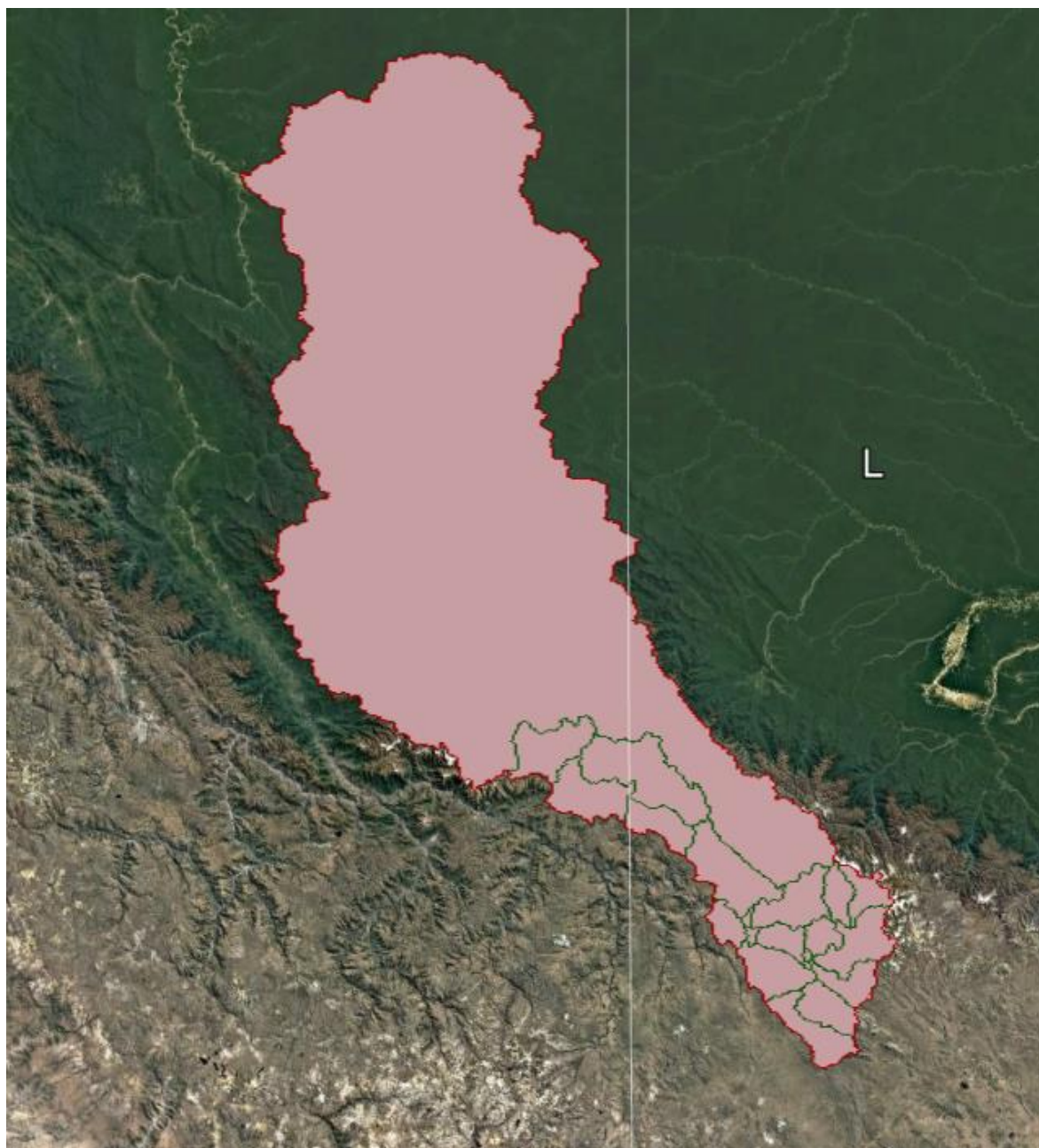
Cuenca Vilcanota-Urubamba



Fuente. Tomado de (ANA 2018)

Figura 2.

Cuenca de estudio



Fuente. Elaboración propia

Tabla 1.

Provincias y distritos dentro de la cuenca de estudio

PAIS	Perú				
DEPARTAMENTO	Cusco				
PROVINCIAS	Acomayo	Anta	Calca	Canas	Canchis
DISTRITOS	Acomayo (Parcial) Acopía Mosoq Llaqta Pomacanchi (Parcial) Sangarara	Anta Acahuasi Cachimayo Huaroscondo Pucyura Zurite	Calca Coya Lamay Pisac San Salvador Taray	Yanaoca (Parcial) Langui Layo Pampamarca Tupac Amaru (Parcial)	Sicuani Checacupe Combapata Marangani Pitumarca San Pablo San Pedro Tinta
PROVINCIAS	Cusco	Paucartambo	Quispicanchi	Urubamba	
DISTRITOS	Cusco Ccorca Poroy San Jeronimo San Sebastian Santiago Saylla Wanchaq	Caicay (Parcial) Colquepata (Parcial) Huancarani (Parcial)	Urcos Andahuaylillas Cusipata Huaros Lucre Oropesa Quiquijana	Urubamba Chinchero Huayllabamba Machupicchu (Parcial) Maras Ollantaytambo Yucay	

Fuente. Elaboración propia

1.6.2 Delimitación Temporal

La investigación se desarrolló en un periodo de 36 años que están comprendidos entre los años 1981-2016 y se distribuye de la siguiente forma:

- Período de calentamiento del modelo: 3 años.
- Período de calibración: 22 años (1981-2005, incluido calentamiento).
- Período de validación: 11 años (2006-2016).

Dado que el análisis se restringe a estos años, los resultados no necesariamente representan la totalidad de variaciones hidrológicas que podrían ocurrir fuera de este intervalo temporal.

Uso de parámetros específicos: Si bien SWAT ofrece una amplia gama de parámetros para la simulación hidrológica, en esta investigación se han calibrado y validado solo los parámetros mencionados en cada uno de los escenarios descritos posteriormente.

Por lo tanto, los resultados reflejan únicamente el comportamiento del modelo bajo la calibración de estos parámetros, y no consideran la influencia de otros factores hidrológicos o ambientales.

Condiciones específicas de la cuenca: Este estudio no busca abarcar todas las condiciones hidrológicas presentes en la cuenca de estudio, sino que se enfoca en las condiciones representadas por los datos de entrada y los parámetros empleados. Factores como cambios en el uso del suelo, variabilidad climática extrema o procesos geohidrológicos no

modelados podrían influir en la corriente real de la cuenca, pero no han sido incluidos en este análisis.

Dado que el estudio se ha realizado en una estación hidrométrica km 105, (Urubamba), los resultados y conclusiones pueden no ser directamente extrapolables a otras áreas dentro de la misma cuenca o a otras cuencas con características diferentes.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes Internacionales.

Se realizó un estudio sobre la aplicabilidad del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la estimación de caudales líquidos y producción de sedimentos en la cuenca del río Coca, Ecuador. En su investigación, se reportó lo siguiente:

La evaluación del modelo mostró resultados satisfactorios con $NSE=0.74$ para el período de calibración y $NSE=0.62$ para el período de validación. Igualmente, se evaluó el desempeño del modelo aguas arriba en la estación H0.715 (Quijos Aj Bombón), obteniéndose resultados satisfactorios: $NSE=0.84$ para el período de calibración y $NSE=0.67$ para el período de validación. El estudio concluyó que el modelo SWAT tiene un potencial en aplicaciones hidrológicas y podría emplearse para estudios comparativos de cambio de uso de suelo o escenarios de cambio climático. (Tamayo García, 2017)

Se realizó un estudio sobre la calibración y validación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la simulación hidrológica de una cuenca en el oeste de Bahía, Brasil. En su investigación, se reportó lo siguiente: “La validación y calibración del modelo se llevó a cabo utilizando el software SWAT-CUP con el algoritmo SUFI-2, obteniéndose valores satisfactorios de eficiencia en la simulación del caudal mensual: $NSE=0.69$ para el período de calibración (2006-2010) y $NSE=0.73$ para el período de validación (2011-2015). Estos resultados indican que el modelo es adecuado para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca”((PDF) Calibration and validation of the SWAT model for hydrological simulation in a basin in Western Bahia, s. f.) El estudio

concluyó que el modelo SWAT puede ser utilizado como herramienta de apoyo para la gestión de los recursos hídricos y la planificación del uso del suelo.

En 2013 se realizó un estudio sobre la aplicación del modelo SWAT para la simulación del caudal en la cuenca del río Rusenski Lom, al norte de Bulgaria. En su investigación menciona lo siguiente:

“Los resultados obtenidos para la calibración del modelo muestran un buen ajuste entre los caudales observados y simulados, con un $NSE=0.70$ en el período de calibración y un $NSE=0.65$ durante la validación. Esto demuestra la capacidad del modelo SWAT para representar los procesos hidrológicos en la cuenca estudiada” ((PDF) *Calibration and validation of the SWAT model for hydrological simulation in a basin in Western Bahia*, s. f.) El estudio concluyó que el modelo puede aplicarse eficazmente en regiones con información hidrométrica limitada para fines de gestión del agua y análisis de escenarios futuros.

2.1.2 Antecedentes Nacionales.

En el estudio se empleó el programa Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la cuenca del Río Cañete para cuantificar todas las variables del balance hídrico del flujo del agua en el suelo (producción de agua, agua en el suelo y recarga de acuífero profundo) y agua en la vegetación (evapotranspiración potencial y actual) para un periodo de 19 años (1991-2009). El modelo fue calibrado y validado comparando con datos existentes de caudal; esta metodología básicamente consistió en:

Para la calibración del modelo se logra un ajuste satisfactorio entre los datos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, con un

periodo de calibración de 8 años de observación (1993-2000) y para su validación del modelo se evaluó la capacidad predictiva mediante la comparación de los datos medidos y simulados para un periodo de 9 años de observación (2001-2009). La capacidad predictiva del modelo se analizó mediante el coeficiente de correlación entre los caudales simulados y medidos, obteniendo valores de 0.62 (diario) y 0.96 (mensual). Además, se verificó el sesgo en Hat–Sutcliffe, obteniendo valores de 0.3 a nivel diario y 0.82 a nivel mensual (*Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT)*, s. f.)

Burga Carrasco realizó un estudio sobre la "Evaluación de la deposición sedimentológica en la subcuenca Racarrumi, cuenca Chancay-Lambayeque, utilizando el modelo SWAT". En su investigación, se reportó lo siguiente:

La estimación de sedimentos a través del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Pitumarca reveló que la zona media de la cuenca presenta la mayor sedimentación, lo que indica una alta tasa de erosión y transporte de sedimentos en esa área. A partir de los resultados obtenidos, el estudio sugirió la implementación de medidas de manejo sostenible del suelo, como la reforestación en las zonas más afectadas y la construcción de estructuras de control para reducir la erosión. Además, se identificaron áreas críticas en las que la actividad humana y el cambio de uso de suelo han exacerbado el proceso de erosión, lo que resulta en una mayor deposición de sedimentos en las partes bajas de la cuenca. El estudio concluyó que el modelo SWAT es una herramienta útil para simular la erosión y la deposición de sedimentos, y que los resultados obtenidos pueden ser utilizados para implementar estrategias de manejo para mitigar la pérdida de suelo y la sedimentación en los cuerpos de agua de la región. (Salas Quispe, 2020)

Autoridad Nacional del Agua (ANA) realizó un estudio sobre la implementación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la cuenca del río Pisco, Perú. En su investigación, se reportó lo siguiente:

La implementación del modelo SWAT en la cuenca del río Pisco incluyó el acopio y procesamiento de datos climáticos, geoespaciales y de uso del suelo. Se configuró el modelo para ajustarlo a las características de la cuenca y se calibró y validó utilizando datos históricos de caudal. El estudio reportó que los resultados obtenidos en la simulación de caudales fueron satisfactorios, lo que permitió realizar análisis de incertidumbre y evaluar el impacto de diversas actividades humanas en los recursos hídricos de la cuenca. Además, se evaluaron los índices de estrés hídrico consuntivo, humano y agrícola, los cuales fueron fundamentales para la gestión del agua en la región. El estudio concluyó que el modelo SWAT es una herramienta eficaz para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Pisco y para la evaluación de escenarios de cambio climático y uso del suelo.(Hídricos, 2022)

2.1.3 Antecedentes Locales

En el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota se evaluó el desempeño y la incertidumbre de la predicción hidrológica utilizando el modelo SWAT. Se realizó un análisis detallado de los parámetros más sensibles durante la calibración del modelo, con el objetivo de entender su impacto en la respuesta hidrológica y los procesos asociados. Como resultado, se identificaron cinco parámetros clave: SURLAG, que influye en la escorrentía superficial; SOL_BD y SOL_AWC, que afectan el flujo lateral; y GWQMN y RCHRG_DP, relacionados con la recarga y descarga de los acuíferos. Además, se detectó que el número de

curva (CN2) puede generar equifinalidad en el modelamiento, lo que implica que su calibración inadecuada podría mejorar el ajuste del modelo a expensas de su sentido físico. A pesar de estos desafíos, los resultados mostraron que SWAT logró reproducir de manera efectiva las descargas observadas, con valores de NSE superiores a 0.75 y un PBIAS menor al 10%, lo que indica un desempeño confiable tanto en calibración como en validación (Palomino, s. f.)

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) realizó un estudio sobre la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del río Vilcanota, Cusco. En su investigación, se reportó lo siguiente:

“La calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Vilcanota permitió obtener valores de NSE superiores a 0.7, indicando una buena representación del comportamiento hidrológico de la cuenca. Estos resultados son fundamentales para la planificación de estrategias de adaptación al cambio climático en la región” (Montaña, 2019) El estudio concluyó que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Vilcanota.

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) realizó en 2022 un estudio sobre el modelamiento hidrológico en las microcuencas Sibina Salma y Ccascara, aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para calibrar y validar los caudales generados. El estudio concluyó que los mayores caudales en ambas microcuencas se presentan entre los meses de enero y abril, con valores que oscilan entre 1.8 m³/s y 2.5 m³/s. El informe resalta que los caudales fueron estimados mediante modelamiento hidrológico sin un proceso de calibración y validación formal, lo que subraya la importancia de contar con información hidrométrica medida en campo. Como recomendación,

se sugiere la instalación de estaciones pluviométricas e hidrométricas con sensores de nivel para mejorar el monitoreo de la disponibilidad hídrica y validar futuros estudios de modelación hidrológica. (*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM*, 2025)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Precipitación

La precipitación es uno de los principales forzantes del ciclo hidrológico y un factor determinante en la generación de escorrentía en una cuenca hidrográfica. Se define como cualquier forma de agua, líquida o sólida, que cae desde la atmósfera a la superficie terrestre (*Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf*, s. f.). Su distribución espacial y temporal influye en la cantidad de agua disponible para los procesos de infiltración, evaporación y escorrentía superficial.

En modelos hidrológicos como el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), la precipitación es una de las variables clave para la simulación de caudales, ya que su variabilidad afecta directamente la generación de escorrentía y la dinámica del flujo en la cuenca. Para su correcta implementación en ArcSWAT, se utilizan registros históricos provenientes de estaciones meteorológicas o productos satelitales que permiten representar su comportamiento en la zona de estudio (P. W. Gassman et al., 2007).

2.2.1.1 Caudales generados por el modelo SWAT

Determinar los caudales simulados por el modelo SWAT requiere la ejecución de simulaciones hidrológicas, integrando información sobre el clima, las propiedades del suelo y

el uso del territorio para estimar el comportamiento del flujo de agua en la cuenca analizada (*swatuserman.pdf*, s. f.-a).

2.2.2 Escorrentía

La escorrentía es el volumen de agua que fluye sobre la superficie terrestre hacia los cuerpos de agua después de un evento de precipitación, una vez que se han satisfecho las demandas de infiltración y evaporación («(PDF) A History of the Concept of Time of Concentration», 2025). Se clasifica en escorrentía superficial, intermedia y subterránea, dependiendo del tiempo de tránsito y la profundidad de circulación del agua en el suelo.

Los caudales observados en una estación hidrométrica representan la escorrentía generada en la cuenca y son el resultado de la combinación de múltiples factores como la topografía, el uso del suelo, la capacidad de almacenamiento del suelo y las condiciones meteorológicas. En el caso del modelo SWAT, la escorrentía se estima a partir de la ecuación del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. ajustando los valores de los parámetros hidrológicos para calibrar el modelo y mejorar la correspondencia con los caudales observados. (K. W. King et al., 1999).

2.2.2.1 Caudales registrados en la estación hidrométrica del KM-105, Urubamba

Los caudales medidos en estaciones hidrométricas son esenciales para la validación de modelos hidrológicos, ya que proporcionan datos reales que permiten evaluar y ajustar las simulaciones. La precisión de estos registros está determinada por la calidad de los instrumentos utilizados y la frecuencia de medición, lo que asegura la fiabilidad de los datos empleados en la calibración de modelos como el SWAT.

El monitoreo de caudales en la estación hidrométrica del KM-105 requiere el uso de un equipo de medición instalado en el lugar, con el fin de obtener registros continuos del volumen de agua que atraviesa dicho punto en la cuenca del Vilcanota (Protocolo de Monitoreo de Caudales, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos). (Cahuide & Tel, s. f.)

2.2.3 Relación precipitación-escorrentía

La relación entre precipitación y escorrentía es un aspecto fundamental en el análisis hidrológico, ya que permite evaluar la respuesta de una cuenca ante eventos de precipitación y entender su comportamiento hidrológico. En términos generales, una mayor precipitación genera un incremento en la escorrentía, pero la magnitud de esta relación depende de factores como la capacidad de infiltración del suelo, la cobertura vegetal y la pendiente del terreno. (*Infiltration and the Water Cycle* | U.S. Geological Survey, s. f.)

Para cuantificar esta relación, se emplean técnicas estadísticas como el coeficiente de determinación (R^2), el Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el Error Cuadrático Medio (RMSE), los cuales permiten evaluar el grado de ajuste entre los caudales simulados (derivados de la precipitación en el modelo SWAT) y los caudales observados en la estación hidrométrica. Una correlación significativa entre estas variables indica que el modelo representa adecuadamente la dinámica hidrológica de la cuenca, mientras que una baja correlación sugiere la necesidad de mejorar la calibración de los parámetros del modelo. (D. N. Moriasi et al., 2007a).

2.2.3.1 Relación entre los caudales generados por el modelo SWAT y los caudales registrados

La calibración del modelo SWAT se realiza mediante la comparación entre los caudales simulados y los registrados en estaciones hidrométricas. Este proceso permite ajustar los parámetros del modelo con el objetivo de reducir las diferencias y mejorar la precisión de las simulaciones. Para evaluar el desempeño del modelo en la estimación de caudales, se emplean métricas estadísticas como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error porcentual absoluto (PBIAS) (D. N. Moriasi et al., 2007a).

El análisis de la relación entre los caudales generados por el modelo SWAT y los observados en la estación hidrométrica implica la comparación de ambos conjuntos de datos utilizando herramientas estadísticas, como el coeficiente de correlación y el error medio absoluto, con el fin de evaluar la precisión de la simulación hidrológica (Guía de Validación de Modelos Hidrológicos). (J. G. Arnold et al., 2012a).

2.3 Marco conceptual.

2.3.1 Caudal

El caudal se define como la cantidad de agua que circula a través de un río o arroyo en un intervalo de tiempo determinado, expresado en unidades de volumen por tiempo, como metros cúbicos por segundo (m^3/s). Este parámetro es esencial en hidrología, ya que permite describir el comportamiento del flujo en una cuenca y resulta clave para la gestión de los recursos hídricos, el diseño de infraestructuras hidráulicas y el análisis de eventos como inundaciones. (*FHA Culvert Design for Aquatic Organism Passage.pdf*, s. f.)

En el ámbito del modelamiento hidrológico, modelos como SWAT emplean el caudal para simular el comportamiento de una cuenca bajo diversas condiciones. La comparación entre los caudales simulados y los registrados en estaciones hidrométricas permite evaluar la precisión del modelo y realizar ajustes en sus parámetros. Una alta correlación entre los valores observados y simulados sugiere que el modelo es una herramienta confiable para predecir la dinámica del flujo en la cuenca, lo que resulta fundamental para la gestión eficiente del agua y el desarrollo de estrategias de control de escorrentías. (Towler et al., 2023)

2.3.1.1 Caudales Máximos

Los caudales máximos representan los valores más elevados del flujo de agua en un río o arroyo durante un período específico, generalmente vinculados a eventos extremos de precipitación. Su análisis es fundamental para el desarrollo de infraestructuras hidráulicas, la mitigación de inundaciones y la gestión eficiente de los recursos hídricos. En el contexto de modelos hidrológicos como SWAT, estos caudales pueden ser estimados para evaluar la respuesta de la cuenca ante condiciones de precipitación extrema. (J. G. Arnold et al., 2012b)

La simulación de caudales máximos en modelos hidrológicos como SWAT permite anticipar el comportamiento de la cuenca frente a lluvias intensas, lo que resulta esencial para el diseño de estrategias de control de inundaciones y una gestión sostenible del agua. La comparación entre los valores simulados y los medidos en estaciones hidrométricas facilita la calibración del modelo, optimizando sus parámetros y mejorando su precisión (J. G. Arnold et al., 2012b)

2.3.2 Hidrogramas

Un hidrograma es un gráfico que representa cómo varía el caudal de un río en función del tiempo en un punto determinado de la cuenca. Esta representación permite identificar el pico de escorrentía y los cambios en la descarga tanto durante un evento de lluvia como a lo largo del año hidrológico. Su análisis es clave para comprender la respuesta hidrológica de una cuenca frente a la precipitación y para el diseño de obras hidráulicas. (*Tema_5_V2.pdf*, s. f.)

2.3.3 Estación Hidrométrica

Una estación hidrométrica es una instalación equipada con instrumentos para medir variables hidrológicas, principalmente el caudal de los ríos, aunque también puede registrar parámetros como el nivel del agua, la velocidad del flujo y la calidad del recurso hídrico. Estas estaciones suministran datos fundamentales para el estudio de la dinámica fluvial, la gestión de los recursos hídricos y la calibración de modelos hidrológicos como SWAT. La información recopilada permite analizar la respuesta hidrológica de una cuenca frente a eventos de precipitación y otras condiciones climáticas, facilitando la toma de decisiones en la planificación y manejo del agua. (*r.j._ndeg_250-2015-ana_0_0.pdf*, s. f.)

La estación hidrométrica situada en el kilómetro 105 de la vía férrea Cusco-Machupicchu, administrada por EGEMSA (Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.), es una de las principales estaciones para el monitoreo del caudal del río Vilcanota, también denominado Urubamba. Ubicada a una altitud de 2,262 msnm, esta estación cuenta con un registro hidrológico de aproximadamente 36 años (1981-2016), convirtiéndose en una fuente de información valiosa para estudios hidrológicos y la calibración de modelos como SWAT. Los datos obtenidos en esta estación permiten examinar la relación entre la

precipitación y la escorrentía en la cuenca del Vilcanota-Urubamba, lo que contribuye a una mejor comprensión de la disponibilidad de agua y a una planificación más eficiente de los recursos hídricos en la región. (2._*diagnostico_urubamba.pdf*, s. f.)

2.3.4 Precipitación media mensual

La precipitación media mensual es el valor promedio de la cantidad de lluvia que se registra en una región determinada durante cada mes del año. Este indicador es crucial en el modelamiento hidrológico, ya que afecta directamente la estimación de la escorrentía, la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua en una cuenca. En el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), este parámetro se emplea para simular procesos hidrológicos y analizar el efecto de distintas prácticas de manejo del suelo y el agua. Un ejemplo de su aplicación se observa en un estudio realizado en la cuenca del río Culiacán, donde SWAT fue utilizado para estimar la producción mensual de agua a partir de datos de precipitación registrados en estaciones climatológicas locales. (*inputs_swatplus.pdf*, s. f.)

La relevancia de la precipitación media mensual en estos estudios radica en su capacidad para reflejar las variaciones estacionales y mensuales de la lluvia, lo que resulta esencial para la adecuada calibración y validación de los modelos hidrológicos. La integración de datos precisos sobre la precipitación mensual mejora la capacidad del modelo para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca ante distintos escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo, permitiendo un manejo más efectivo de sistemas hídricos. Asimismo, este parámetro es clave para analizar el impacto del cambio climático en los patrones de precipitación y su influencia en la disponibilidad de agua dentro de la cuenca. (Arango-Carvajal et al., 2025)

2.3.5 Precipitación media anual

La precipitación media anual se define como el valor promedio de la lluvia que cae en una región determinada a lo largo de un año. Este indicador es esencial para el análisis del balance hídrico de una cuenca, ya que afecta directamente la disponibilidad de agua para distintos fines, como el consumo humano, la actividad agrícola y la producción de energía hidroeléctrica. En el modelamiento hidrológico, herramientas como SWAT utilizan la precipitación media anual como un parámetro clave para simular procesos como la escorrentía, la infiltración y la recarga de acuíferos. Esto permite evaluar el impacto de distintos escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo sobre la disponibilidad de recursos hídricos en una cuenca. (Arnold et al., s. f.-a)

2.3.6 Relación entre caudales

Comparar los caudales simulados por el modelo SWAT y los caudales históricos en la estación hidrométrica del km 105 es crucial para evaluar la precisión del modelo en la representación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Urubamba.

El modelo SWAT estima caudales a partir de datos climáticos, características del suelo, cobertura y uso del territorio, así como parámetros hidrológicos. Por otro lado, los caudales medidos en la estación hidrométrica del km 105 corresponden a valores reales del flujo del río. La confrontación de ambos conjuntos de datos permite detectar diferencias y realizar ajustes en los parámetros del modelo con el fin de optimizar su desempeño predictivo. ((PDF) *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*, s. f.)

Para esta evaluación, uno de los indicadores más empleados es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual determina el grado de concordancia entre los valores modelados y los observados. Un NSE próximo a 1 indica que el modelo tiene una alta capacidad de reproducción de los caudales registrados, mientras que valores negativos reflejan una inadecuada representación de la dinámica hidrológica de la cuenca. (D. N. Moriasi et al., 2007b)

Además, el análisis de la relación entre los caudales permite examinar la influencia de factores como el cambio climático y las alteraciones en el uso del suelo sobre la disponibilidad hídrica. Por ejemplo, modificaciones en la cobertura vegetal pueden modificar las tasas de infiltración y escorrentía, afectando la precisión de las simulaciones hidrológicas. En este contexto, la integración de herramientas como SWAT y los datos de la estación hidrométrica del km 105 resulta fundamental para desarrollar estrategias de manejo del agua y reducir los riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos. (Gassman et al., s. f.)

2.3.7 Ciclo Hidrológico

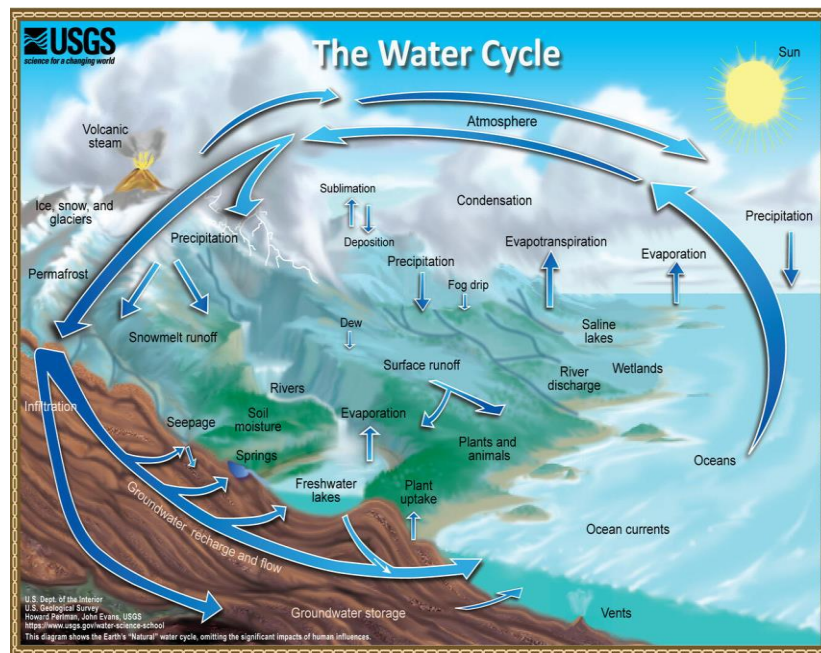
El ciclo hidrológico es el mecanismo natural mediante el cual el agua circula y se redistribuye entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo, impulsado por la radiación solar y la fuerza de gravedad. (*Groundwater Dictionary*, s. f.) Este proceso incluye diversas etapas, como la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía, las cuales desempeñan un papel clave en la regulación de la disponibilidad de agua en los ecosistemas. («Climate System», 2025)

La escorrentía ocurre cuando la cantidad de precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, generando flujos superficiales que se desplazan hacia cuerpos de agua («Escorrentía», 2025). Por otro lado, la infiltración es el mecanismo por el cual el agua se introduce en el suelo, contribuyendo a la recarga de acuíferos y al flujo base de los ríos). (*Evaluating three commonly used infiltration methods for permeable surfaces in urban areas using the SWMM and STORM | Hydrology Research | IWA Publishing*, s. f.)

En este contexto, herramientas de modelamiento hidrológico como el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) permiten simular la dinámica del ciclo hidrológico en una cuenca, integrando variables como la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía para evaluar su impacto en la disponibilidad de agua («SWAT Model», 2025). Debido a su capacidad de análisis, SWAT es ampliamente empleado en la planificación y gestión de recursos hídricos, ya que posibilita la predicción de cambios en el flujo de agua bajo diferentes condiciones climáticas y de uso del suelo. (Neitsch et al., s. f.)

La comprensión del ciclo hidrológico es esencial dentro del modelamiento hidrológico con SWAT, ya que el modelo incorpora cada uno de estos procesos para simular el comportamiento hídrico de una cuenca. Analizar la distribución y el movimiento del agua a través de los distintos componentes del sistema terrestre es fundamental para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos (Neitsch et al., s. f.)

Figura 3.
Ciclo del agua



Fuente. Tomado de (United States Geological Survey 2019)

2.3.8 Sistemas

El ciclo hidrológico es un sistema global compuesto por tres subsistemas interconectados: atmosférico, superficial y subterráneo. El subsistema atmosférico incluye la evaporación, transpiración y condensación, que regulan la humedad y la precipitación; el subsistema superficial abarca el escurrimiento, la acumulación de agua en ríos y lagos, y su interacción con la vegetación; mientras que el subsistema subterráneo comprende la infiltración, el almacenamiento en acuíferos y el flujo subterráneo. Dentro de estos subsistemas, los principales procesos hidrológicos son la evaporación, la precipitación y el escurrimiento total (superficial, sub-superficial y subterráneo). Cada subsistema tiene una capacidad de almacenamiento de agua durante un determinado intervalo de tiempo, conocido como tiempo

de residencia, lo que influye en la regulación del agua y su disponibilidad para los ecosistemas y actividades humanas. (*Aquabook*, s. f.)

Subsistema atmosférico

El subsistema atmosférico se abastece de la evaporación, un proceso impulsado por la energía solar y la atmósfera alta, que permite el paso del agua desde la superficie del océano y del terreno a la atmósfera en forma de vapor. En áreas con cubierta vegetal, este proceso se combina con la transpiración de las plantas, dando lugar a la evapotranspiración. El vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica a distintas regiones geográficas donde, bajo condiciones adecuadas, se condensa y precipita en forma de lluvia, nieve, hielo o rocío, abandonando así el subsistema atmosférico. La precipitación puede caer sobre los océanos o los continentes, donde, por acción de la gravedad, se desplaza e incorpora a los subsistemas superficial y subterráneo. Sin embargo, una parte de esta precipitación no entra en estos procesos, ya que queda retenida en la vegetación o en superficies artificiales, fenómeno conocido como intercepción, que impide su participación en el ciclo hidrológico inmediato.

Subsistema superficial

La precipitación, ya sea en forma de nieve o lluvia, representa la principal entrada de agua al subsistema. Una vez descartada el agua interceptada, el volumen restante comienza a acumularse y, bajo la influencia de la gravedad, se desplaza en forma líquida, dando lugar al escurrimiento superficial. Este flujo de agua se moviliza a través de los sistemas de drenaje regionales hasta alcanzar los océanos, mientras que otra parte se infiltra en el suelo, alimentando el subsistema subterráneo.

Subsistema subterráneo

La entrada a este subsistema proviene principalmente de la infiltración. Una parte del agua infiltrada percola a mayor profundidad y se almacena como agua subterránea, mientras que otra fracción circula de manera horizontal en una capa cercana a la superficie, un proceso conocido como escurrimiento sub-superficial. Este tipo de escurrimiento es más lento que el superficial y contribuye de manera gradual al flujo base de los ríos y cuerpos de agua.

2.3.9 Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los procesos hidrológicos reales, diseñados para simular el comportamiento de los sistemas de agua en respuesta a diversas entradas, como la precipitación, la evaporación y las características del terreno. Estos modelos pueden ser clasificados en dos categorías principales: modelos determinísticos y modelos estocásticos. Los modelos determinísticos se basan en relaciones físicas y matemáticas para predecir el comportamiento del sistema, mientras que los modelos estocásticos incorporan elementos de probabilidad y estadística para representar la incertidumbre y la variabilidad inherente a los procesos hidrológicos. (*Hydrological models - Uncertainties in long-term management of water resources*, s. f.)

2.3.9.1 Tipos de modelos hidrológicos

Nos enfocaremos en los modelos matemáticos, los cuales representan los sistemas hidrológicos a través de ecuaciones y expresiones matemáticas. Estos modelos son los más empleados en la actualidad debido a su capacidad de simular con precisión los procesos hidrológicos. («(PDF) La Utilización de Modelos En Hidrología», s. f.)

Además, existen los modelos físicos y analógicos. Los modelos físicos son representaciones a escala que conservan las relaciones de semejanza con la realidad, mientras que los modelos analógicos, actualmente en desuso, aprovechan la similitud matemática entre diferentes sistemas. Por ejemplo, ciertos circuitos eléctricos pueden emplearse para simular el comportamiento de acuíferos, ya que las diferencias de potencial en el modelo eléctrico son equivalentes a los gradientes hidráulicos en el sistema real. («Hydrological Model», 2025)

Tipos de modelos matemáticos hidrológicos

Los modelos matemáticos se dividen en dos categorías principales:

a) Estocásticos: También conocidos como modelos de series temporales, no poseen una base física y expresan los resultados en términos probabilísticos, dado que los procesos hidrológicos presentan una alta variabilidad aleatoria. («(PDF) La Utilización de Modelos En Hidrología», s. f.)

b) Determinísticos: Representan el ciclo hidrológico o partes de este mediante ecuaciones analíticas que describen las interacciones físicas entre sus componentes (*Model Classification*, s. f.). Dependiendo de la forma en que consideran la variabilidad espacial, se subdividen en:

b.1) Agregados: No contemplan variabilidad espacial, es decir, tratan a la cuenca como una única celda homogénea. Se introducen valores promedio de las variables, como la precipitación y la evapotranspiración, para estimar el caudal en un punto de salida. Su principal ventaja radica en su simplicidad y menor necesidad de datos para la calibración; sin embargo,

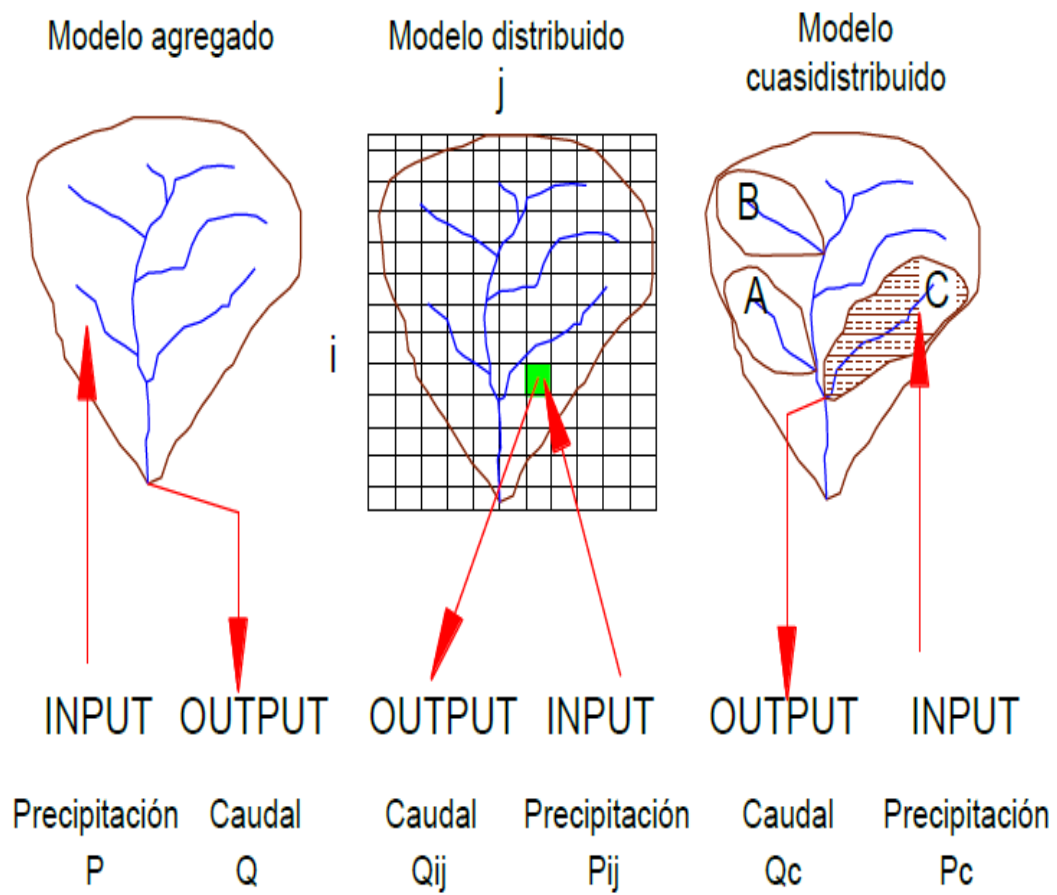
solo proporcionan valores medios sin detallar variaciones internas dentro de la cuenca (*General principles of hydrological modelling*, s. f.)

b.2) Distribuidos: Incorporan la variabilidad espacial dividiendo la cuenca en múltiples celdas con valores específicos de precipitación, escorrentía e infiltración. Esto permite una representación más detallada de los procesos hidrológicos, pero requiere una gran cantidad de datos y una calibración compleja para evitar resultados erróneos, aunque aparentemente precisos («Vflo», 2023)

b.3) Cuasidistribuidos: Buscan equilibrar la precisión de los modelos distribuidos con la simplicidad de los agregados, segmentando la cuenca en subcuencas en lugar de celdas individuales. De este modo, mejoran la representación espacial sin demandar una cantidad excesiva de datos (*Model types & tools - Hydromodel SA Wiki*, s. f.)

Figura 4.

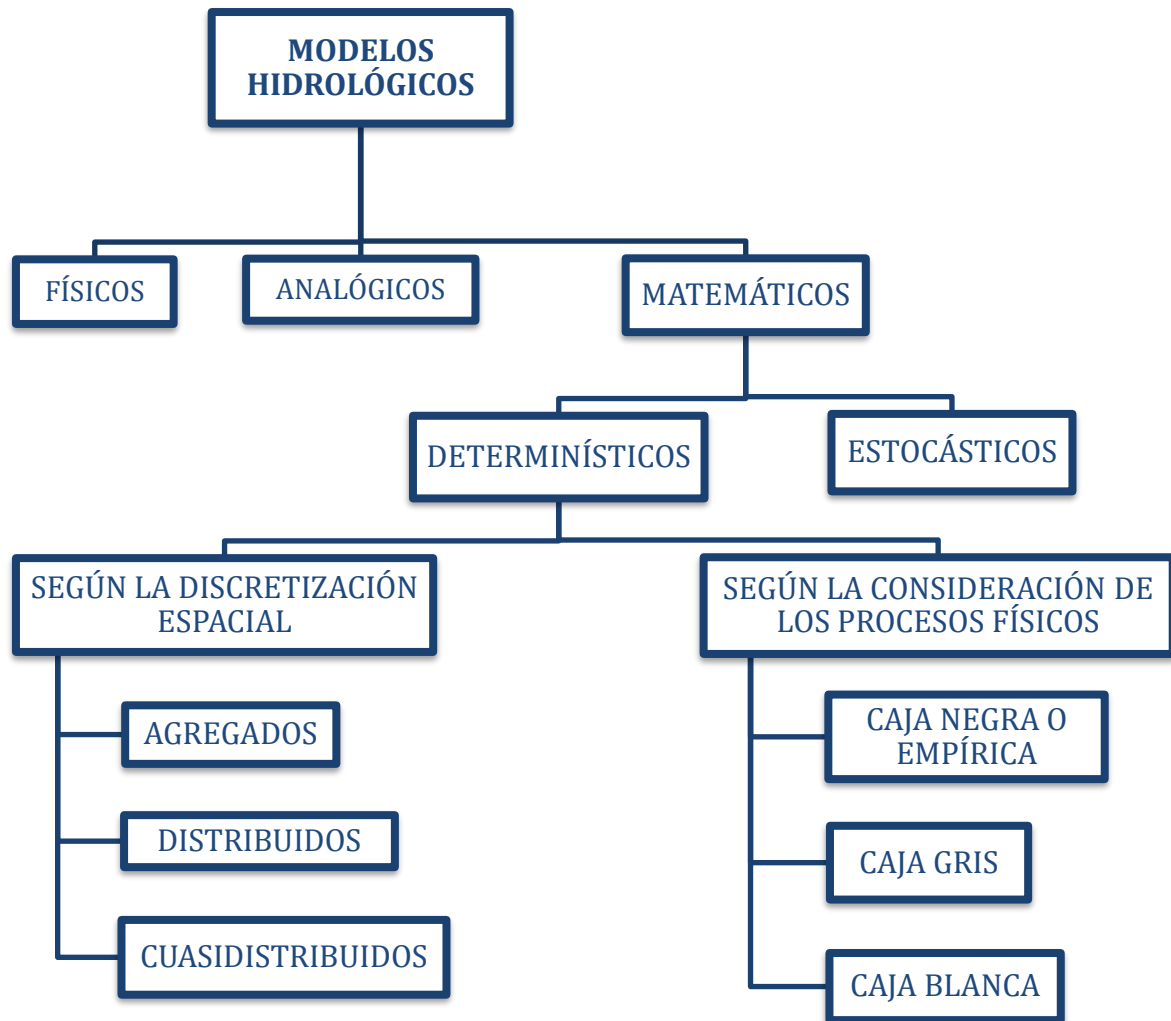
Ejemplo de los tres grados de desratización para una cuenca hidrográfica



Fuente. Tomado de (Fernández et al., 2012)

Figura 5.

Clasificación de modelos hidrológicos



Fuente. Tomado de (Fernández et al., 2012)

C hidrología de la cuenca y proporciona una base sólida para la calibración y validación del modelo SWAT.

2.3.16 Modelo Digital de Elevación

El Modelo de Elevación Digital (DEM) es una herramienta clave en el análisis hidrológico, ya que permite representar la topografía de la superficie terrestre en una matriz de celdas regulares, facilitando la delimitación de cuencas, la generación de redes de drenaje y la simulación de flujos de agua (Wechsler, 2007). En esta investigación se utilizó el DEM ALOS PALSAR, un recurso cartográfico ampliamente utilizado en estudios ambientales. Este modelo proviene de datos obtenidos mediante el satélite ALOS, puesto en órbita en enero de 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y conocido en Japón como "DAICHI".

Entre el 16 de mayo de 2006 y el 22 de abril de 2011, el satélite ALOS adquirió imágenes de radar con cobertura de 50 km × 70 km en todo el mundo aproximadamente cada 45 días, utilizando su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar), lo que permitió obtener información detallada sobre la topografía terrestre.

2.3.17 Cobertura vegetal- Uso de suelo

El uso del suelo se refiere a la manera en que los seres humanos emplean la superficie terrestre, mientras que la cobertura vegetal describe la vegetación presente en una región. Ambos factores influyen en los procesos hidrológicos, como la infiltración y la escorrentía, afectando el balance hídrico de una cuenca (*Discussion papers*, s. f.). Los datos de cobertura vegetal y uso del suelo necesarios para el modelado pueden obtenerse de diversas fuentes en línea, cada una con resoluciones distintas. Por ejemplo, el United States Geological Survey (USGS) proporciona estos datos con una resolución de 400 metros, mientras que Global Land Cover ofrece información con una resolución de 30 metros. Según el informe de la Autoridad

Nacional del Agua (ANA) sobre la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Urubamba, la zona de estudio se caracteriza por una vegetación frondosa. En términos de composición, el 73% corresponde a bosque húmedo, el 16.5% a pajonal altoandino y solo el 2.6% está destinado a la agricultura costera y altoandina. Además, debido al alto grado de protección de estas tierras, la cobertura vegetal no ha experimentado cambios significativos en los últimos años.

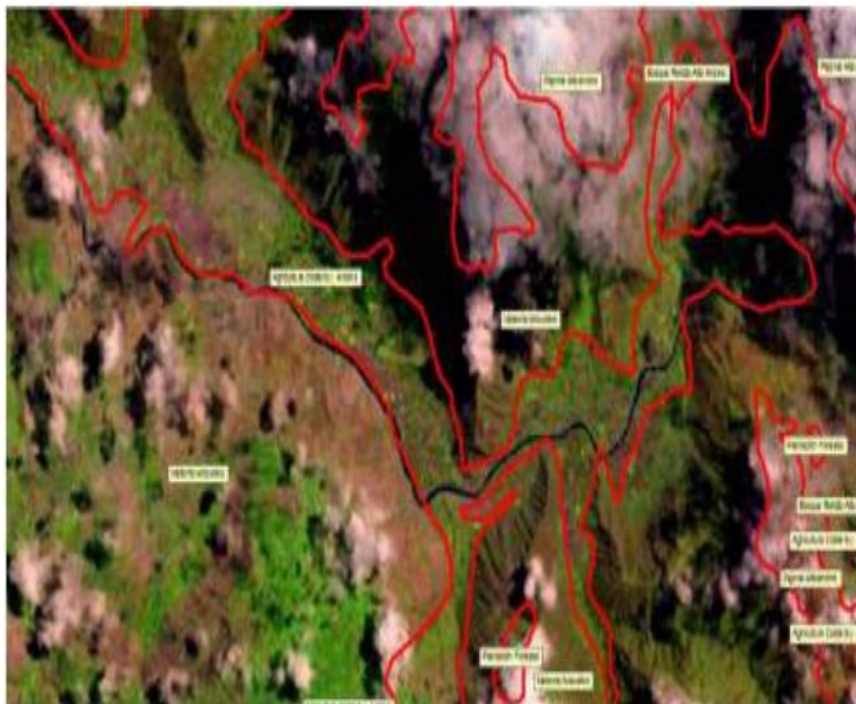
En esta cuenca, el uso del suelo se clasifica en áreas agrícolas, praderas con arbustos, regiones áridas, zonas húmedas, áreas urbanizadas y cuerpos de agua.

Figura 4.
Zona agrícola definida en el shape de cobertura vegetal



Fuente. Tomado de (web Earth Explorer y cobertura vegetal MINAM, 2011)

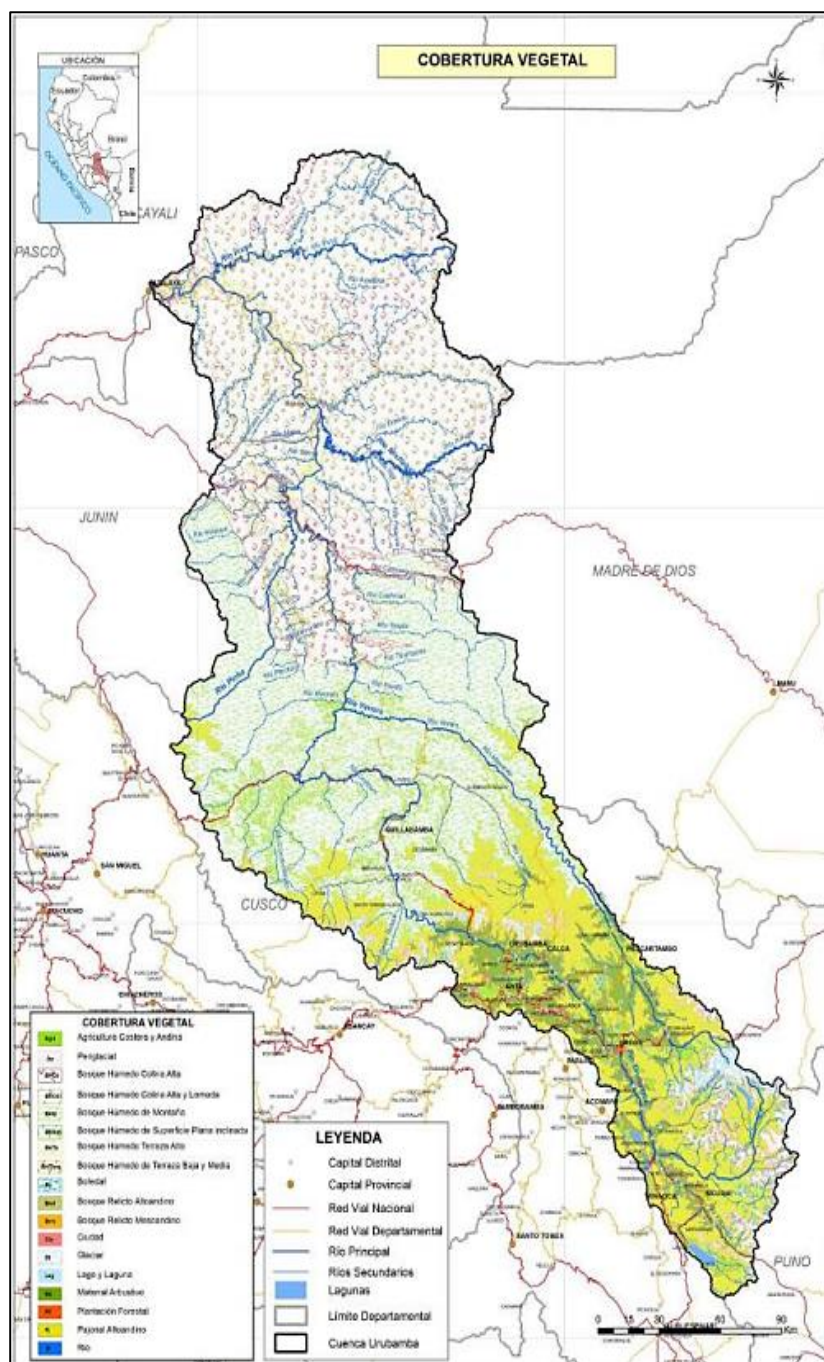
Figura 5.
Comprobación cobertura vegetal



Fuente. Tomado de (Landsat 8, imágenes marzo 2015 y datos MINAM, 2011)

Figura 6.

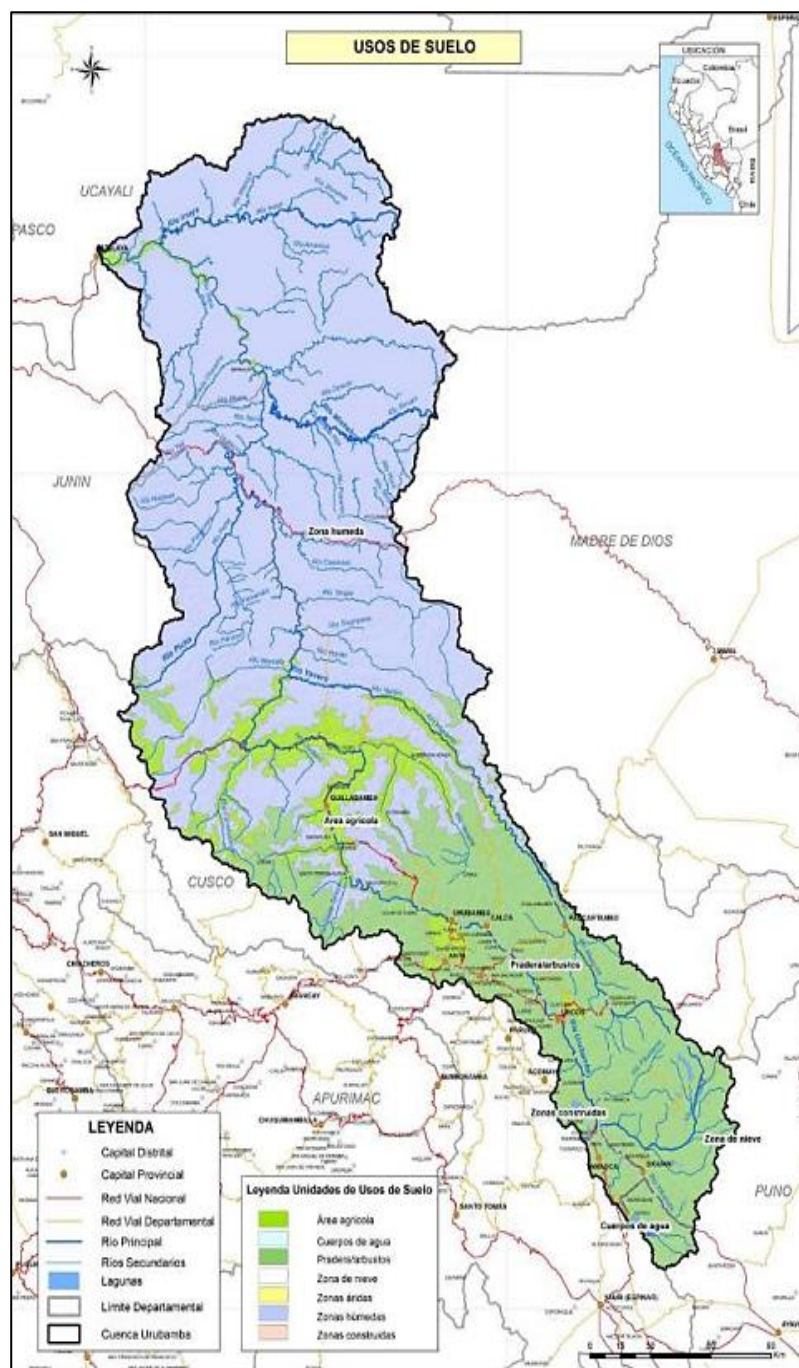
Cobertura vegetal de la cuenca Vilcanota-Urubamba



Fuente. Tomado de (ANA, 2015)

Figura 7.

Usos del suelo en la cuenca Vilcanota-Urubamba.



Fuente. Tomado de (SNIRH ANA, 2014)

2.3.18 Número de Curva (CN)

El Número de Curva (CN) constituye un parámetro hidrológico fundamental para evaluar la capacidad de generación de escorrentía en cuencas hidrográficas. Su cálculo integra variables físico-ambientales como las propiedades de cobertura vegetal (tipología, densidad y manejo), combinado con la clasificación hidrológica del suelo. Este parámetro deriva del método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), reconocido entre las metodologías de modelización hídrico-ambiental de mayor aplicación global. No obstante, estudios recientes evidencian un interés creciente por reinterpretar este indicador como un descriptor geográfico integral de las dinámicas territoriales, trascendiendo su función hidrológica original («(PDF) Determinación Del Número de Curva En La Subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) Mediante Teledetección y SIG», s. f.)

La profundidad del sistema radicular y la distribución espacial de la cobertura vegetal son factores clave en la estimación del Número de Curva (CN), parámetro fundamental en la metodología del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Existe una relación inversa entre la densidad de la vegetación y el valor del CN, lo que se evidencia al comparar escenarios contrastantes: suelos desprovistos de vegetación, con procesos erosivos incipientes, presentan valores de CN elevados debido a su limitada capacidad de infiltración; mientras que aquellos con coberturas vegetales densas y homogéneas favorecen la infiltración a través de la interceptación foliar y la macroporosidad inducida por raíces, resultando en valores de CN reducidos. Esta dinámica confirma el papel modulador de la vegetación en los procesos hidrológicos y en la estimación de la escorrentía superficial (*Evaluation of the Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method for Flash Flood Runoff Estimation in Arid Regions: A Case Study of Central Eastern Desert, Egypt*, s. f.)

2.3.18.1 Grupo hidrológico del suelo

La clasificación hidrológica de suelos se fundamenta en su capacidad de infiltración, organizándose en cuatro grupos jerárquicos:

- Grupo A: Suelos de alta permeabilidad y mínima generación de escorrentía, caracterizados por texturas gruesas (predominio de arenas o limos arenosos).
- Grupo B: Suelos con permeabilidad moderada, representados por perfiles franco-arenosos de profundidad intermedia o francos profundos.
- Grupo C: Suelos de baja permeabilidad, identificados por texturas franco-arcillosas o arcillosas, con reducida capacidad de infiltración bajo condiciones de saturación.
- Grupo D: Suelos prácticamente impermeables, ya sea por composición arcillosa masiva o por la presencia de estratos arcillosos que restringen el flujo hídrico vertical.

Respecto a los grupos hidrológicos y al uso de suelo, tenemos la tabla 2.

Tabla 2.

Valores de número de curva según grupo hidrológico y cobertura

Descripción de uso de suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Sin clasificar	54	70	80	85
Zona urbana	81	88	91	93
Cultivos y pastizales en seco	68	79	86	89
Cultivos y pastizales irrigados	62	71	78	81
Cultivos y pastizales mixtos	65	75	82	85
Mosaico de cultivos y pastos	65	75	82	85
Mosaico de cultivos y bosques	45	66	77	83
Pastizales	54	70	80	85
Matorrales	45	66	77	83

Pastizales/Matorrales	49	68	78.5	84
Sabana	57	73	82	86
Bosque caducifolio de hoja ancha	45	66	77	83
Bosque caducifolio de hojas aguja	45	66	77	83
Bosque perenne de hoja ancha	25	55	70	77
Bosque perenne de hoja aguja	25	55	70	77
Bosque mixto	35	60.5	73.5	80
Cuerpos de agua	98	98	98	98
Bofedal	30	58	71	78
Humedal arbolado	25	55	70	77
Zona sin o con escasa vegetación	68	79	86	89
Tundra herbácea	98	98	98	98
Tundra boscosa	98	98	98	98
Tundra mixta	98	98	98	98
Tundra desnuda	98	98	98	98
Nieve o hielo	98	98	98	98

Fuente. Adaptado de (Asante et al., 2008)

Respecto a los grupos hidrológicos y al tipo de suelo, tenemos la tabla 3.

Tabla 3.

Descripción de suelos

Descripción de suelos	Simbología	Grupo hidrológico
Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico	ACh-ALh-LXh	C
Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico	ACh-ALh-LVx	C
Arenosol háplico - Solonchak háplico	ARh-SCh	A
Cambisol dístrico - Acrisol háplico	CMd-Ach	C
Cambisol dístrico - Acrisol háplico - Lixisol háplico	CMd-ACh-LXh	C
Cambisol dístrico - Alisol háplico	CMd-Alh	C
Cambisol dístrico - Nitisol háplico	CMd-NTh	C
Cambisol éutrico - Phaeozem háplico	CMe-PHh	B
Cambisol éutrico - Vertisol éutrico	CMe-Vre	C
Fluvisol éutrico - Gleysol éutrico	FLe-Gle	B
Fluvisol éutrico - Regosol éutrico	FLe-Rge	B
Gleysol dístrico - Cambisol dístrico	GLd-CMd	B
Gleysol dístrico - Histosol fíbrico	GLd-HSf	D
Gleysol dístrico - Lixisol háplico - Fluvisol dístrico	GLd-LXh-FLd	A
Leptosol dístrico - Afloramiento lítico	LPd-R	B

Leptosol dístrico - Andosol ·mbrico - Afloramiento lítico	LPd-ANu-R	B
Leptosol dístrico - Andosol vítrico	LPd-Anz	B
Leptosol dístrico - Cambisol dístrico - Regosol dístrico	LPd-CMd-RGd	B
Leptosol dístrico - Regosol dístrico - Afloramiento lítico	LPd-RGd-R	B
Leptosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-R	B
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico	LPe-Cme	C
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico - Regosol éútrico	LPe-CMe-Rge	B
Leptosol éútrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico	LPe-KSh-R	B
Leptosol éútrico - Regosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-RGe-R	B
Leptosol lítico - Afloramiento lítico	LPq-R	B
Lixisol háplico - Gleysol dístrico	LXh-GLd	B
Luvisol crómico - Cambisol éútrico	LVx-Cme	C
Regosol dístrico - Afloramiento lítico	RGd-R	B
Regosol dístrico - Cambisol dístrico	RGd-CMd	C
Regosol éútrico - Andosol móllico	RGe-Anm	C
Regosol éútrico - Calcisol háplico	RGe-CLh	C
Regosol éútrico - Cambisol éútrico	RGe-Cme	C
Solonchak háplico - Leptosol éútrico	SCh-Lpe	A

Fuente. Adaptado de (Autoridad Nacional del Agua, 2015)

2.3.19 Tipo de suelo

El tipo de suelo se clasifica según sus características físicas y químicas, como la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura, factores que influyen directamente en su capacidad de infiltración, retención y almacenamiento de agua. Los suelos con una textura gruesa, como los arenosos, presentan alta infiltración, pero baja capacidad de almacenamiento, mientras que los suelos arcillosos tienen menor infiltración y mayor retención de agua. Estas propiedades son determinantes en la dinámica del ciclo hidrológico y en la modelación de la escorrentía y la humedad del suelo en modelos hidrológicos como SWAT (*Evaluation of total infiltration and storage capacities for different soil types in Sarawak using SWMM | Discover Water*, s. f.)

El mapa digital de suelos del mundo y las propiedades edáficas están disponibles en la base de datos de la FAO (1995, 2003), con una resolución de 8 km. Esta información es fundamental para estudios hidrológicos y de modelación de escorrentía. Además de la FAO, existen otras plataformas en línea que proporcionan acceso a datos de suelos con distintas resoluciones, permitiendo una mejor representación espacial en modelos hidrológicos como SWAT.

2.3.20 Mapa de pendientes

Nuestra zona de estudio presenta una topografía accidentada, caracterizada por múltiples pendientes, lo que influye en la dinámica hidrológica al afectar la velocidad de escorrentía, la infiltración y la erosión del suelo. Estas variaciones topográficas deben considerarse en la calibración del modelo SWAT para una adecuada representación del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Tabla 4.

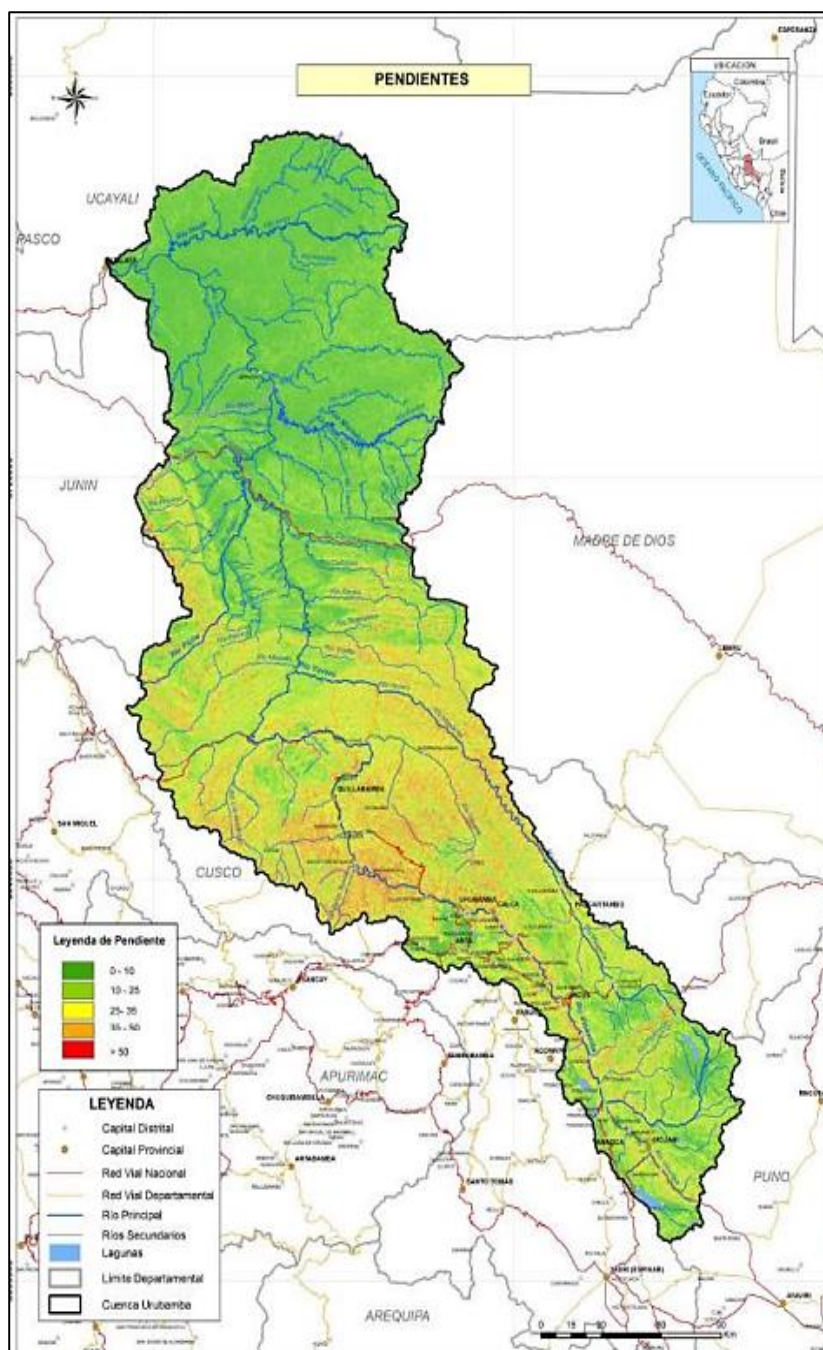
Intervalos representativos, asociados a las geoformas principales

	Terrenos prácticamente llanos, terrazas, abanicos aluviales, planicies
0° a 10°	costaneras, fondos de valles glaciales
10° a 25°	Terrenos de pendiente suave, colinas, lomadas, mesetas.
25° a 35°	Terrenos de pendiente moderada, vertientes, laderas de la Cordillera.
35° a 50°	Terrenos de pendiente fuerte, laderas escarpadas y valles tributarios.
> a 50°	Terrenos muy escarpados, tramos de valles encañonados

Fuente. Adaptado de (ANA, 2015)

Figura 8.

Pendientes de la cuenca Vilcanota-Urubamba



Fuente. Tomado de (ANA, 2015)

2.3.21 Precipitación

La precipitación se refiere a cualquier forma de agua, líquida o sólida, que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, incluyendo lluvia, nieve, granizo y aguanieve (*Precipitation.pdf*, s. f.) .Es un componente clave del ciclo hidrológico, ya que influye directamente en la escorrentía, la infiltración y la recarga de acuíferos, siendo un factor determinante en la disponibilidad de los recursos hídricos de una cuenca.

2.3.22 Temperatura máxima y mínima

La temperatura máxima y mínima son parámetros climáticos fundamentales que influyen en los procesos hidrológicos de una cuenca. La temperatura máxima representa el valor más alto alcanzado durante el día, mientras que la temperatura mínima corresponde al valor más bajo registrado en un periodo de 24 horas. Estos valores afectan la evapotranspiración, la fusión de nieve y el balance hídrico general de un sistema, determinando la cantidad de agua disponible en la superficie y el subsuelo (Lofgren et al., 2011)

En el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), la temperatura máxima y mínima desempeñan un papel crucial en la estimación de la evapotranspiración y otros procesos hidrológicos, como la infiltración y la generación de escorrentía. La precisión en la entrada de estos datos mejora la simulación de la dinámica del agua en la cuenca, permitiendo una calibración más realista del modelo y una mejor representación del balance hídrico en diferentes condiciones climáticas (*swatuserman.pdf*, s. f.-b)

2.3.23 Resolución de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales poseen cuatro tipos de resolución: espacial, temporal, espectral y radiométrica.

2.3.23.1 Resolución espacial

La resolución espacial indica la dimensión del área terrestre que un píxel representa en una imagen satelital, lo que define el grado de detalle que se puede observar. Se expresa en metros y varía según el satélite.

Por ejemplo, los satélites de resolución intermedia, como Landsat, cuentan con una resolución de 30 metros, mientras que Sentinel logra alcanzar los 10 metros. Asimismo, existen satélites de mayor precisión, como PlanetScope con 3 metros, Worldview-3 con 1.24 metros y el satélite peruano Perusat-1, que proporciona una resolución de 0.70 metros.

2.3.23.2 Resolución temporal

El período entre capturas sucesivas de una misma ubicación por un satélite varía dependiendo de la misión, pudiendo ir desde imágenes diarias hasta registros espaciados por varios años. Por ejemplo, el satélite Landsat 8 cuenta con un intervalo temporal de 16 días, lo que implica que cada 16 días se obtiene una nueva imagen del mismo sitio. Una mayor frecuencia de captura permite un monitoreo más detallado de los cambios en la superficie terrestre, mejorando la capacidad de análisis y detección de variaciones en el entorno.

2.3.23.3 Resolución espectral

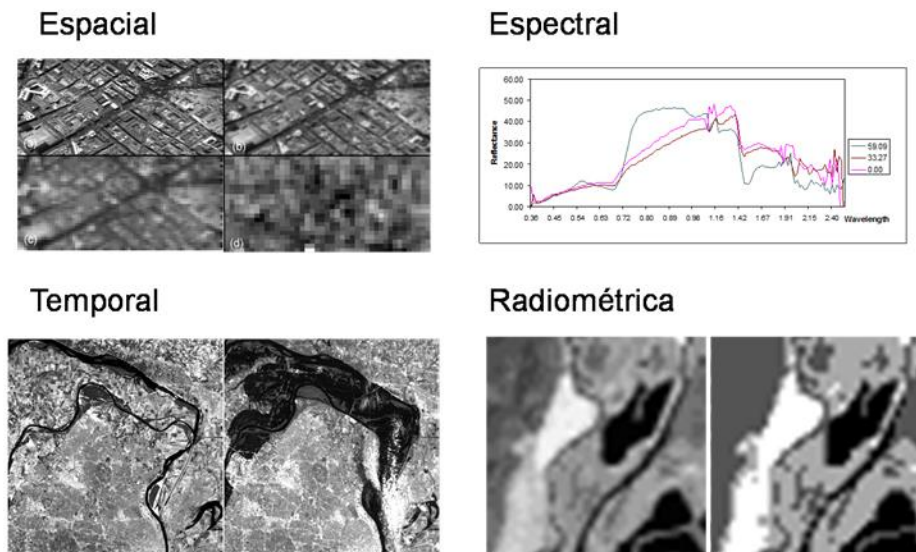
La capacidad de un sensor para diferenciar elementos de la superficie terrestre, como la vegetación, la humedad y los tipos de suelo, depende tanto del número de bandas espectrales como de su ancho. Existen sensores monoespectrales, multiespectrales e hiperespectrales, siendo estos últimos los más avanzados, ya que pueden registrar más de cien bandas, aunque su procesamiento requiere técnicas computacionales más complejas. Un ejemplo de sensor multiespectral es el del satélite Sentinel-2, que cuenta con 13 bandas espectrales que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano, con anchos de banda variables. Gracias a esta configuración, es posible analizar con precisión distintos componentes del paisaje, como cuerpos de agua, tipos de suelo y coberturas vegetales.

2.3.23.4 Resolución radiométrica

La resolución radiométrica indica la capacidad del sensor para detectar mínimas variaciones en la radiación captada. Se expresa en función del número de bits utilizados para almacenar la información de cada píxel, lo que determina la cantidad de niveles digitales posibles en la imagen. Esta relación se representa mediante la fórmula $R_{\text{radiométrica}} = 2^{\text{número de bits}}$. Por ejemplo, el satélite Sentinel-2 posee una resolución radiométrica de 12 bits, lo que permite representar hasta 4096 niveles de intensidad en cada píxel, mejorando la precisión en la detección de diferencias sutiles en la reflectancia de la superficie terrestre.

Figura 9.

Configuración, estructura y característica de las imágenes de teledetección.



Tomado de (Ingeoexpert, 2025)

2.3.24 Codificación de cuencas (Sistema Pfafstetter)

El método de codificación Pfafstetter, diseñado en 1989 por Otto Pfafstetter, se emplea para la delimitación de cuencas hidrográficas y posteriormente fue reconocido como estándar internacional por el United States Geological Survey (USGS). Esta técnica asigna códigos a cada cuenca, permitiendo establecer relaciones con otras cuencas vecinas, internas o locales (Data Series, 2017)

El procedimiento del método sigue estos pasos:

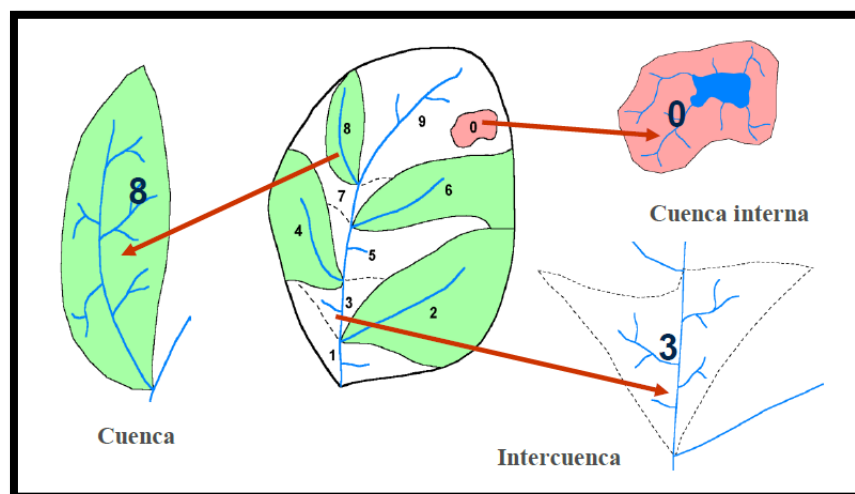
- Se segmenta una cuenca hidrográfica sin considerar su extensión, reconociendo los cuatro principales afluentes del río principal en función del área que abarcan.

- A los afluentes más importantes se les asignan números pares (2, 4, 6 y 8), siguiendo un orden desde la parte baja hasta el alta de la cuenca.
- Los tributarios secundarios, conocidos como intercuenas, reciben números impares (1, 3, 5, 7 y 9), también en dirección ascendente.

Cada una de estas cuencas puede subdividirse nuevamente aplicando el mismo criterio. Como se observa en la figura 3, una cuenca con el código 8 puede dividirse en unidades más pequeñas, generando subcuencas con identificadores del 81 al 89. Los nuevos dígitos se agregan al código de la cuenca de mayor jerarquía.

Figura 10.

Sistema Pfafstetter



Fuente. Tomado de (Autoridad Nacional del Agua, 2012)

El método establece que, para las dos unidades de mayor jerarquía dentro del río principal, la de mayor extensión recibirá el código 9, mientras que la de menor tamaño será identificada con el código 8. En caso de la presencia de cuencas endorreicas o internas, la más extensa se codificará con el número 0, mientras que las de menor tamaño serán integradas a las cuencas o intercuencas adyacentes (556.pdf, s. f.)

Figura 11.

Cuenca Vilcanota



Fuente. Tomado de (Autoridad Nacional del Agua, s.f.)

2.3.25 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial delimitada por una línea divisoria de aguas, la cual conecta los puntos de mayor elevación del relieve y direcciona el escurrimiento hacia un único punto de salida. Este sistema es clave en los estudios hidrológicos, ya que influye en procesos como la interceptación de la precipitación, la evapotranspiración y la generación de escorrentía. Para su caracterización, se consideran tres grupos de parámetros:

- Fisiográficos: Vinculados con la extensión, morfología y relieve de la cuenca.
- Geomorfológicos: Relacionados con la estructura y evolución del terreno, incluyendo pendientes, orientación y litología.
- De drenaje: Enfocados en la red hidrográfica, considerando factores como la densidad de cauces, la jerarquía fluvial y el tiempo de concentración del agua.

2.3.25.1 Parámetros fisiográficos

2.3.25.1.1 Área (A)

Se trata de la representación planimétrica del área en la que las aguas superficiales convergen hacia un mismo cauce natural, cuyo punto de salida constituye el exutorio de toda la escorrentía generada. Este atributo fisiográfico es fundamental en la gestión de los recursos hídricos, ya que permite dimensionar la escala espacial de captación y evaluar la capacidad potencial de recolección y almacenamiento de agua en función de la morfología de la cuenca.

2.3.25.1.2 Perímetro (P)

Hace referencia a la extensión total de la línea divisoria de aguas que define los límites de una cuenca hidrográfica. Si bien este parámetro fisiográfico no aporta información hidrológica de manera directa, su determinación es fundamental como insumo para el cálculo de índices morfométricos que caracterizan la dinámica y estructura de la cuenca.

2.3.25.1.3 Longitud axial (La)

Es la distancia máxima en línea recta que existe entre el punto más remoto de la divisoria de aguas y la desembocadura de la cuenca. Este parámetro es clave en el análisis hidrológico, ya que influye en el tiempo de concentración del flujo y en la dinámica de escorrentía dentro del sistema hidrográfico.

2.3.25.1.4 Ancho Promedio (Ap)

Es la medida que se obtiene de la división del área de la cuenca y la longitud axial.

$$Ap = \frac{A}{La}$$

Donde:

- A = Área
- La = Longitud axial

2.3.22.1.5 Factor de forma (Ff)

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud axial.

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

Donde:

- A= Área
- La = Longitud axial

El coeficiente de forma de una cuenca está directamente relacionado con su vulnerabilidad a inundaciones. Cuencas con valores bajos de este coeficiente presentan una menor tendencia a crecidas rápidas en comparación con aquellas de igual superficie, pero con coeficientes más altos. Un valor elevado sugiere una geometría que facilita la rápida acumulación y desplazamiento del flujo superficial durante precipitaciones intensas, lo que puede derivar en picos de caudal abruptos y un mayor riesgo hidrológico (*Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies - Obeidat - 2021 - Journal of Flood Risk Management - Wiley Online Library, s. f.*)

Tabla 5.

Clases de forma según rango de valores de Ff

Ff	Clases de forma
<0.22	Muy alargada
0.22-0.30	Alargada
0.30-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.60	Ligeramente ensanchada

0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada

Fuente. Tomado de (Pérez, 1979), como se citó en (Navarro, 2021)

2.3.25.1.6 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelious (K)

El coeficiente de compacidad (Kc) es un indicador adimensional que evalúa la forma de una cuenca al comparar su perímetro real (P) con el de un círculo de igual área, proporcionando información sobre su regularidad geométrica. Dado que Kc siempre es mayor o igual a 1, valores próximos a la unidad sugieren una morfología más circular, lo que implica tiempos de concentración más cortos y una mayor posibilidad de picos de caudal intensos. En contraste, coeficientes más altos caracterizan cuencas alargadas, donde la respuesta hidrológica tiende a ser más gradual y atenuada.

$$K = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- P = Perímetro
- A = Área de la cuenca

Tabla 6.
Clasificación de cuencas según el índice de compacidad.

K	Clases de compacidad
<1.25	Redonda a oval redonda

1.25-1.5	De oval redonda a oval oblonga
1.5-1.75	De oval oblonga a rectangular

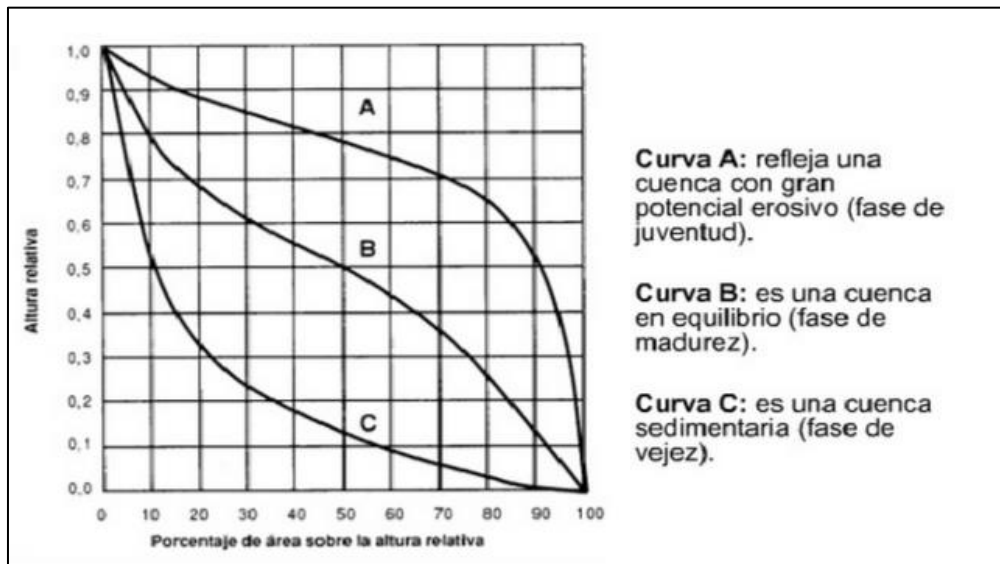
Fuente. Tomado de J.J., (2004), como se citó en Tacusi y Hacha (2015)

2.3.25.2 Parámetros geomorfológicos

2.3.25.2.1 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una herramienta gráfica que vincula la altitud del terreno con la superficie acumulada de la cuenca por encima de esa cota. Su versión adimensional facilita la comparación entre cuencas de diferentes escalas o condiciones climáticas, especialmente en zonas donde la precipitación y la evaporación varían con la altura. Este análisis permite evaluar la fase evolutiva del relieve (juvenil o maduro) y su impacto en procesos como la erosión diferencial y la distribución de la escorrentía. Además, complementa estudios hidrológicos al integrarse con parámetros como el coeficiente de compacidad (K_c) y el área (A), resultando útil en la predicción del comportamiento hídrico en cuencas con variabilidad en la cobertura vegetal o suelos de baja permeabilidad (Grupos C/D).

Figura 6.
Tipos de Curvas Hipsométrica según la edad del río.



Fuente. Tomado de (Ibáñez et al., 2011)

2.3.25.2.2 Polígono de frecuencia de altitudes

El polígono de frecuencia de altitudes es una representación gráfica que sirve como complemento a la curva hipsométrica adimensional, permitiendo analizar la distribución relativa de las áreas correspondientes a distintos rangos altitudinales dentro de una cuenca. Esta herramienta cuantifica la proporción de superficie que ocupa cada franja altimétrica definida entre curvas de nivel, proporcionando información clave sobre la morfología del terreno y su influencia en la dinámica hidrológica.

2.3.25.2.3 Altitud media

La altitud media (H_m) es un parámetro fisiográfico clave para comprender la dinámica hidrológica de una cuenca, ya que influye en la distribución de la precipitación, la evapotranspiración y la generación de caudales provenientes del deshielo. Este indicador, obtenido a partir de la curva hipsométrica adimensional, facilita la estimación de la disponibilidad hídrica a lo largo del año, especialmente en cuencas de montaña donde su variabilidad determina la sincronización entre el derretimiento de nieve y las necesidades agrícolas. Además, su análisis en conjunto con índices morfométricos (como el coeficiente de compacidad y el área de la cuenca) y factores ambientales (como la cobertura vegetal y el tipo de suelo) mejora la precisión de los modelos de escorrentía, lo que resulta fundamental en escenarios de cambio climático para anticipar variaciones en la recarga de acuíferos y la incidencia de eventos extremos como sequías o inundaciones.

2.3.25.2.4 Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente es una aproximación geométrica que modela una cuenca hidrográfica mediante un rectángulo que posee el mismo perímetro (P), área (A) y coeficiente de compacidad (K_c), conservando sus características morfométricas esenciales.

En este modelo, las curvas de nivel se simplifican como líneas rectas paralelas al lado más corto del rectángulo, que simboliza el punto de salida de la cuenca. Esta aproximación, basada en la homología geométrica, facilita la evaluación comparativa de parámetros hidrológicos como el tiempo de concentración y la pendiente media, además de optimizar la aplicación de modelos de lluvia-escorrentía en cuencas con características heterogéneas. Al reducir la complejidad topográfica, esta metodología permite analizar la relación entre la geometría y procesos como la escorrentía en suelos de baja permeabilidad (Grupos C/D) o la

reducción de caudales pico en cuencas más alargadas, integrando variables como el Número de Curva (CN), el área y Kc en estudios de planificación y gestión de recursos hídricos (*Caracterización hidrológica de la microcuenca del río Huanta - Huanta - Ayacucho - 2016*, s. f.)

El lado mayor del rectángulo se halla con la fórmula:

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

El lado menor del rectángulo se halla con la fórmula:

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

Donde:

- L = lado mayor del rectángulo equivalente
- l = lado menor del rectángulo equivalente
- K = Coeficiente de compacidad
- A = Área

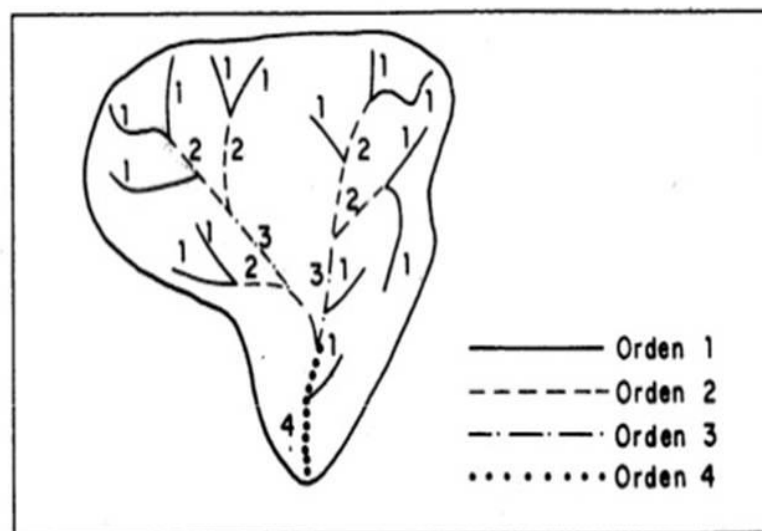
2.3.22.2.5 Parámetros de drenaje

2.3.22.2.5.1 Grado de ramificación

El índice de ramificación es un sistema jerárquico para clasificar la estructura de la red fluvial de una cuenca, cuantificando su complejidad mediante órdenes de corrientes. El método más utilizado, propuesto por Arthur Strahler en la década de 1940, establece:

- Corriente de primer orden: Corrientes que no tienen tributarios
- Corriente de segundo orden: Cuando dos corrientes de primer orden se unen
- Corriente de orden $n+1$: Cuando dos corrientes de orden n se unen

Figura 7.
Ordenes de ríos según Strahler



Fuente. Tomado de (Vega, 2020)

2.3.25.2.5.2 Densidad de drenaje (Dd)

Es la relación entre la longitud total de corrientes y la unidad de área.

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

Donde:

- Li = longitud total de corrientes
- A = área de la cuenca

La densidad de drenaje (Dd) es un indicador que describe la eficiencia de una cuenca para canalizar la escorrentía superficial. Valores altos de Dd reflejan una red hidrográfica bien estructurada, en la que la precipitación se convierte rápidamente en aumentos de caudal dentro del sistema fluvial. En contraste, cuencas con una cobertura vegetal densa y pendientes suaves tienden a presentar valores bajos de este índice, ya que la vegetación favorece la intercepción y la infiltración, reduciendo la escorrentía directa. Asimismo, suelos con alta permeabilidad, como los clasificados en los Grupos A y B, promueven una mayor absorción del agua, lo que limita el desarrollo de una red de drenaje extensa y contribuye a la atenuación del flujo superficial.

Según Monsalve (1999), la densidad de drenaje presenta los siguientes rangos:

- Alrededor de 0.5 km/km² en cuencas con drenaje deficiente.
- Hasta 3.5 km/km² en cuencas con un drenaje excepcionalmente eficiente.

Por otro lado, Fuentes (2004) plantea la siguiente clasificación:

Tabla 7.

Clases según rangos de densidad de drenaje.

Rangos de densidad	Clases
0.1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

Fuente. Adaptado de (Fuentes, 2004)

2.3.25.2.5.3 Densidad de corrientes (Dc)

Es el número de corrientes perennes o intermitentes por unidad de área.

$$Dc = \frac{Ns}{A}$$

Donde:

- Ns = número de corrientes perennes o intermitentes
- A = área de la cuenca

2.3.25.2.5.4 Extensión media de escurrimiento (Es)

Es la distancia promedio que debe recorrer el agua de precipitación antes de alcanzar un curso de agua cercano.

$$Es = \frac{A}{4 * Li}$$

Donde:

- A = Área de la cuenca
- Li = Longitud total de los cursos de agua

2.3.26 *Producto Pisco*

El Producto PISCO por sus siglas en inglés, que significa Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations es una base de datos desarrollada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Este conjunto de datos proporciona información interpolada de variables climáticas como precipitación y temperatura, con una resolución espacial aproximada de 5 km x 5 km. Cubre todo el territorio peruano desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016.

PISCO se basa en la combinación de:

- Datos de estaciones meteorológicas terrestres
- Climatologías de referencia
- Productos de reanálisis y observaciones satelitales

Gracias a su metodología de interpolación y su alta resolución espacial, PISCO es una herramienta clave para estudios hidrológicos, modelamiento climático y análisis de tendencias meteorológicas en el Perú (Aybar Camacho et al., 2017)

2.3.27 Otros softwares

R: Es un software y lenguaje de programación de código abierto enfocado en el análisis estadístico, la manipulación de datos y la generación de gráficos. Su funcionalidad puede ampliarse mediante paquetes desarrollados por la comunidad de usuarios, lo que lo hace altamente versátil para diversas aplicaciones analíticas (*R: The R Project for Statistical Computing*, s. f.)

SWAT-CUP: Herramienta con interfaz gráfica que permite realizar la calibración, validación y evaluación de la incertidumbre en el modelo SWAT. Para optimizar los parámetros y mejorar la precisión de las simulaciones, emplea métodos como SUFI-2, GLUE y ParaSol (*SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT | Request PDF*, s. f.)

SWAT OUTPUT: Son los archivos de salida generados por el modelo SWAT, donde se almacenan los valores simulados de variables hidrológicas como caudales, transporte de sedimentos y concentraciones de nutrientes. Estos resultados son clave para el análisis y la interpretación de la dinámica hidrológica en una cuenca (Neitsch et al., s. f.)

ArcGIS: Sistema de información geográfica (SIG) desarrollado por Esri, utilizado para la administración, análisis y representación de datos espaciales. Sus herramientas permiten realizar modelados geoespaciales y apoyar la toma de decisiones en ámbitos como la gestión

ambiental y la planificación territorial (*Software de representación cartográfica SIG, Inteligencia de ubicación y Análisis espacial* | Esri, s. f.)

2.3.28 Variables climáticas para la calibración del modelo SWAT

El modelo SWAT requiere datos climáticos diarios, incluyendo temperaturas máxima y mínima, radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, para representar con precisión los procesos hidrológicos. Estas variables son fundamentales para la calibración del modelo, permitiendo obtener predicciones fiables sobre caudales, transporte de sedimentos y nutrientes (Arnold et al., s. f.-b)

El proceso de calibración del modelo SWAT a partir de variables climáticas implica la optimización de parámetros relacionados con la temperatura, la precipitación y la radiación solar, empleando registros históricos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Arnold et al., s. f.-b)

$$SWt = SWo + \sum_{i=1}^t (Rdía - Qsurf - ETa - Wseep - Qgw)$$

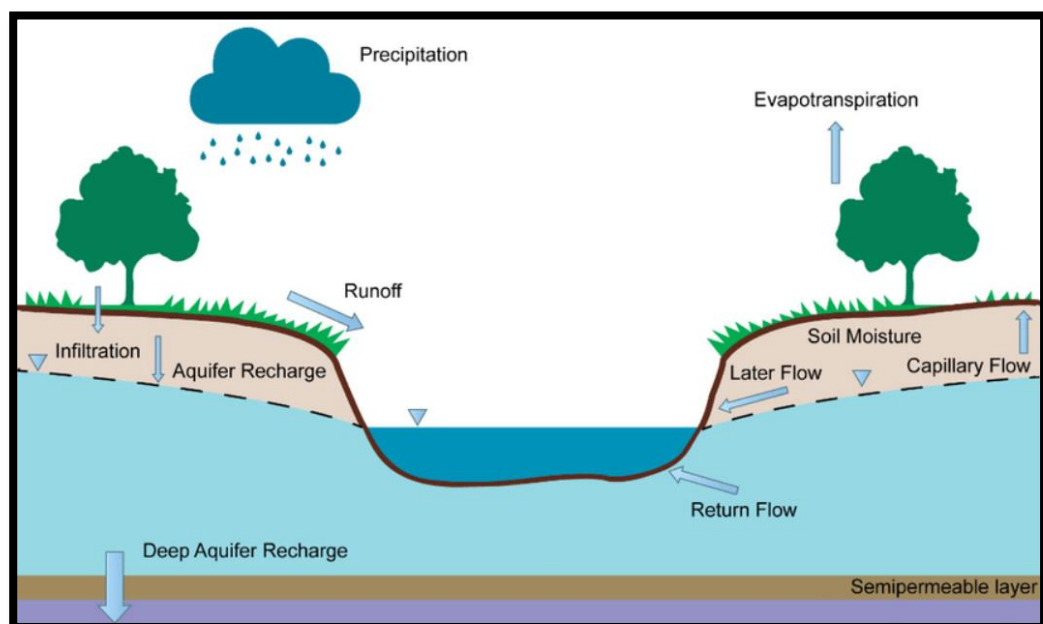
Donde:

- SWt: Es el contenido final de agua en el suelo (mm).
- SWo: Es el contenido inicial de agua del suelo (mm).
- t: Es el tiempo (días).

- R_{dia} : Es la cantidad de precipitación en un día i (mm).
- Q_{surf} : es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm).
- E_a : Es la cantidad de evapotranspiración en día i (mm).
- W_{sweep} : Es la cantidad de agua que entra la zona no saturada del perfil del suelo en un día i (mm).
- Q_{gw} : Es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

Figura 8.

Representación esquemática del concepto del balance hidrológico SWAT



Fuente. Tomado de (Abbas & Xuan, 2019).

2.3.29 Procesos Hidrológicos y Modelación de la Escorrentía en SWAT

2.3.30.1 Comportamiento de la precipitación en altura

En cuencas de alta montaña como la del río Vilcanota hasta el km 105, la precipitación no es uniforme con la altitud. SWAT permite ajustar la precipitación en función de la altura mediante dos métodos principales:

- Método de Thiessen (Interpolación espacial).
- Regresión altitudinal (Corrección por altura).

El segundo método es más adecuado para cuencas con un fuerte gradiente altitudinal, como la del Vilcanota, donde las precipitaciones pueden aumentar o disminuir dependiendo de la altitud y las condiciones climáticas.

SWAT utiliza la siguiente ecuación exponencial para estimar la variación de la precipitación con la altura:

$$P = P_0 \times e^{-\alpha(Z-Z_0)}$$

Donde:

- P: Precipitación corregida a una altura Z.
- P₀: Precipitación registrada a una altura Z₀.
- α: Coeficiente de decrecimiento con la altitud.

- Z: Altura de la subcuenca.

Si α es positivo, la precipitación disminuye con la altitud (ocurre en algunas regiones tropicales y desérticas), pero si α es negativo, la precipitación aumenta con la altitud (en zonas donde las montañas capturan humedad, como en el Vilcanota).

En altitudes extremas (>5000 m), la precipitación tiende a disminuir porque el aire frío contiene menos vapor de agua.

2.3.30.2 Balance hídrico en SWAT

El modelo hidrológico de SWAT se basa en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \Sigma(P - Q_s - ET - PERC - Q_g)$$

Donde:

- SW_t : Humedad del suelo en el tiempo t.
- SW_0 : Humedad del suelo inicial.
- P: Precipitación (corregida por altitud).
- Q_s : Escorrentía superficial.
- ET: Evapotranspiración.
- PERC: Percolación al acuífero.

- Qg: Descarga subterránea.

Entonces:

- Si $P > ET + PERC + Qg$ hay más escorrentía superficial.
- Si $ET + PERC$ es alto, hay más infiltración y menor escorrentía.

2.3.30 Cálculo de Escorrentía Superficial (Método SCS-CN)

El método SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number) es un enfoque empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. (SCS, ahora NRCS). Se usa ampliamente en hidrología para estimar la escorrentía directa generada por un evento de precipitación.

El modelo SWAT usa este método para calcular la escorrentía en cada unidad de respuesta hidrológica (HRU, Hydrological Response Unit), dependiendo del uso de suelo, tipo de suelo y humedad inicial.

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

Si $P \leq I_a$, no hay escorrentía ($Q_s=0$).

Donde:

- Qs: Escorrentía superficial (mm).

- P: Precipitación (mm).
- Ia: Retención inicial (Ia=0.2S)

La retención inicial Ia representa las pérdidas de agua antes de que ocurra la escorrentía (infiltración inicial, interceptación, evaporación). Esto significa que el 20% del almacenamiento potencial del suelo se usa antes de generar escorrentía.

- S: Capacidad máxima de almacenamiento en el suelo: $S = \frac{25400}{CN} - 254$

Donde CN es el número de curva, que depende del uso de suelo, tipo de suelo y humedad.

Si el CN es alto > 80, la escorrentía será mayor porque serán suelos impermeables como en ciudades y suelos arcillosos y si el CN es bajo < 60 existirá mayor infiltración y habrá menos escorrentía como en bosques y suelos arenosos.

En SWAT, el cálculo de la escorrentía se hace para cada HRU considerando:

- DEM (Modelo de Elevación Digital) donde se determina la pendiente y dirección del flujo.
- Mapa de Uso de Suelo (Global Land Cover) donde se define coberturas como bosques, cultivos, zonas urbanas.
- Mapa de Suelos (FAO, SoilGrids) donde nos proporciona propiedades del suelo.

- Datos climáticos (PISCO, estaciones meteorológicas) donde nos proveen precipitación y temperatura.

Cada HRU tiene un valor único de CN basado en su combinación de suelo y uso de tierra. SWAT calcula la esorrentía diaria sumando los eventos de precipitación y aplicando la ecuación del SCS-CN.

2.3.31 Modelación del deshielo en SWAT

El modelo SWAT incluye un módulo específico para representar la fusión de nieve y hielo en zonas de alta montaña, donde la esorrentía generada por el deshielo es un componente clave del balance hídrico. Este proceso es relevante en la cuenca del Vilcanota hasta el km 105, debido a la presencia de glaciares y nevados que aportan caudal adicional durante la temporada seca.

El deshielo en SWAT se basa en el método grado-día, una aproximación empírica que asume que la cantidad de nieve o hielo que se funde es proporcional a la diferencia entre la temperatura media del aire y una temperatura umbral llamada temperatura base (T_{base}).

La ecuación que rige este proceso es:

$$M_s = SMT \times (T_{mean} - T_{base})$$

Donde:

- M_s : Cantidad de nieve/hielo derretida en un día (mm).

- SMT: Factor de fusión de nieve (Snow Melt Factor), calibrable según la región.
- Tmean: Temperatura media diaria del aire (°C).
- Tbase: Temperatura umbral para que inicie la fusión de nieve/hielo (°C).

Entonces, Si $T_{mean} < T_{base}$, no ocurre deshielo, ósea la nieve se acumula y si $T_{mean} > T_{base}$, se activa la fusión de nieve y se genera escorrentía adicional.

2.3.31.1 Impacto del deshielo en la escorrentía de la Cuenca de estudio

En la zona de estudio, que abarca desde el nacimiento del Vilcanota hasta el km 105, las áreas de mayor altitud contienen glaciares y nieve estacional, lo que genera una importante descarga de agua en los siguientes escenarios:

En temporada húmeda existe alta acumulación de nieve debido a temperaturas frías, además la escorrentía proveniente principalmente de precipitaciones directas.

En temporada seca la escorrentía superficial disminuye, pero el deshielo mantiene el caudal del río, además en años cálidos, el aumento del SMT incrementa la descarga de agua desde los glaciares.

En la modelación para las regiones altas, el deshielo contribuye significativamente al caudal del Vilcanota, además SWAT usa las temperaturas registradas en la estación PISCO para estimar la fusión de nieve en cada subcuenca.

2.3.32 *Análisis estadístico para modelos hidrológicos*

El análisis estadístico es un componente fundamental en la evaluación de modelos hidrológicos, especialmente en estudios donde se busca entender la relación entre variables hidrometeorológicas, como la precipitación y la escorrentía. En el contexto de esta tesis, cuyo objetivo general es analizar la relación precipitación-escorrentía calibrando el modelo SWAT en la estación hidrométrica del km 105 del río Urubamba (2024), el uso de herramientas estadísticas permite evaluar tanto la fidelidad del modelo como la naturaleza del comportamiento hidrológico observado y simulado.

2.3.32.1 *Relación precipitación-escorrentía*

La relación precipitación-escorrentía describe cómo las lluvias que caen sobre una cuenca generan escorrentía superficial, lo cual depende de múltiples factores como el uso del suelo, tipo de suelo, pendiente y condiciones climáticas. Esta relación puede ser analizada mediante correlaciones estadísticas entre los datos de entrada (precipitación) y los caudales observados o simulados (escorrentía) (Arnold et al., s. f.-c)

2.3.32.2 *Análisis de frecuencia hidrológica*

El análisis de frecuencia consiste en contar cuántas veces ocurren ciertos valores de caudal en un periodo de tiempo. Las frecuencias pueden expresarse en forma absoluta o relativa:

Frecuencia absoluta (f_i): número de veces que se repite un valor o rango.

Frecuencia relativa (f_r):

$$fr = \frac{fi}{n}$$

donde f_i es la frecuencia absoluta de la clase i y n es el número total de datos.

Este análisis es esencial para comparar la respuesta del modelo SWAT en los caudales simulados frente a los caudales observados.

2.3.32.3 Amplitud de clases

La amplitud es el rango que abarca cada clase en una tabla o histograma de frecuencia.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{k}$$

Donde:

- $Q_{\max}$: caudal máximo
- $Q_{\min}$: caudal mínimo
- K : número de clases, estimado por la regla de Sturges:

$$k = 1 + 3.322 \log_{10}(n)$$

Este análisis es clave para los Objetivos Específicos 1 y 2, ya que permite evaluar la variabilidad y concentración de los caudales tanto simulados como observados (*R-universe search: data*, s. f.).

2.3.32.4 Formas de distribución: unimodal y bimodal

Una distribución unimodal presenta un único pico o clase de mayor frecuencia, lo cual indica un régimen hidrológico simple con una sola estación de lluvias o una respuesta dominante de escorrentía. Este tipo de comportamiento es típico de cuencas con marcada estacionalidad (, *1st Edition - Cengage*, s. f.)

En contraste, una distribución bimodal presenta dos picos bien definidos, lo que sugiere la presencia de dos temporadas lluviosas o la influencia de mecanismos mixtos como lluvias y deshielos. Reconocer estos patrones permite inferir procesos físicos relevantes para la calibración de modelos hidrológicos (*Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Volume 100 - 3rd Edition | Elsevier Shop*, s. f.)

La identificación de estos patrones puede realizarse mediante histogramas de frecuencia, gráficos de densidad y análisis visual de la forma de la distribución (*Statistical Methods in HYDROLOGY-Haan | PDF | Autoregressive Integrated Moving Average | Probability Theory*, s. f.).

2.3.32.5 Análisis de correlación entre variables hidrológicas

Para evaluar la relación entre precipitación y escorrentía, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (R), que mide la fuerza de una relación lineal entre dos variables:

$$R = \frac{\Sigma(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\Sigma(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot \Sigma(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}}$$

Donde:

- $Q_{obs,i}$: caudal observado
- $Q_{sim,i}$: caudal simulado
- Q : media de caudales

El coeficiente de determinación se obtiene al elevar al cuadrado y representa la proporción de la varianza explicada por el modelo. Valores de indican buen ajuste para fines hidrológicos (*Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*, s. f.)

2.3.32.6 Indicadores de desempeño del modelo hidrológico

Se recomienda usar los siguientes indicadores para complementar la evaluación estadística de la calibración del modelo SWAT

- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\Sigma(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\Sigma(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

- Error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}$$

- Índice de Willmott (d)

$$d = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (|Q_{obs} - Q_{obs}| + |Q_{sim} - Q_{obs}|)^2}$$

Estos indicadores son ampliamente aceptados en la literatura para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos («(PDF) Hydrologic and Water Quality Models», s. f.).

2.3.32.7 Aplicación del software Statgraphics

El software Statgraphics Centurion permite realizar análisis estadístico de datos hidrológicos, tales como histogramas, análisis de frecuencia, normalidad, correlación y regresión. Su interfaz gráfica es especialmente útil para visualizar distribuciones unimodales y bimodales, calcular amplitudes y frecuencias, y aplicar pruebas de ajuste como Kolmogórov-Smirnov (Inc, s. f.)

Statgraphics también permite ajustar funciones de distribución teórica, calcular coeficientes de correlación y visualizar la relación entre precipitación y escorrentía mediante

gráficos de dispersión, boxplots y curvas de densidad. Esto lo convierte en una herramienta efectiva para los objetivos planteados en esta investigación (Inc, s. f.)

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General.

H.G: La relación de precipitación-escorrentía es directa calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

2.4.2 Hipótesis Específicas.

H.E.01: La amplitud y frecuencia en los caudales generados por las precipitaciones presentan una concordancia directa con los patrones observados en la cuenca de estudio aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

H.E.02: La variación en amplitud y frecuencia de la escorrentía en los caudales registrados está asociada a cambios en los patrones de precipitación en la estación hidrométrica del km 105 Urubamba 2024.

H.E.03: Existe un grado de correlación directa entre la precipitación y la escorrentía, calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.

2.5 Identificación de Variables e indicadores

Tabla 8

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Precipitación	Según Hewlett & Hibbert (1967, p. 1), la precipitación se refiere a cualquier tipo de agua, ya sea en estado líquido o sólido (como lluvia, nieve, aguanieve y granizo), que desciende desde la atmósfera hasta la superficie terrestre.	La precipitación se define como la cantidad de agua, medida en milímetros, que se recoge en un recipiente estándar expuesto a la intemperie durante un periodo de tiempo específico.	Frecuencia y Amplitud	Tiempo Caudal	Años, meses y días m 3/s
Escorrentía	La escorrentía se define como el flujo de agua que se mueve sobre la superficie del suelo hacia cuerpos de agua, generado por la precipitación o el deshielo. (Chow et al., 1988, p. 64)	La escorrentía se describe como la cantidad de agua que circula por unidad de tiempo en un punto determinado de un curso de agua o en la desembocadura de una cuenca hidrográfica.	Frecuencia y Amplitud	Tiempo Caudal	Años, meses y días m 3/s

Fuente. Elaboración propia.

Capítulo III: METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, dado que es necesario medir y analizar distintas variables mediante métodos estadísticos. Este tipo de investigación se fundamenta en la recopilación de información numérica para evaluar hipótesis, identificar tendencias y verificar teorías a través del análisis de datos (Hernández et al., 2014, p. 4).

El presente estudio tiene un alcance correlacional-descriptivo. Se considera correlacional porque busca determinar el grado de relación entre dos variables: precipitación y escorrentía, a través de la comparación entre caudales simulados y registrados. A su vez, es descriptivo, ya que caracteriza la cuenca de estudio tanto en sus aspectos cualitativos como cuantitativos.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de nuestra investigación es de tipo no experimental, porque no se han modificado las variables, sino que se analizará la relación entre ellas en su estado natural. Asimismo, es un estudio longitudinal, dado que examina la evolución de este fenómeno a lo largo del tiempo.

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.3.1 Obtención de datos de entrada.

3.3.1.1 Información cartográfica

Se recopiló información del Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS PALSAR con una resolución espacial de 30 m × 30 m a través del servidor Earth Data - Alaska Satellite Facility de la NASA. Este DEM fue seleccionado debido a su alta resolución, cobertura extensa y baja incidencia de errores en regiones montañosas.

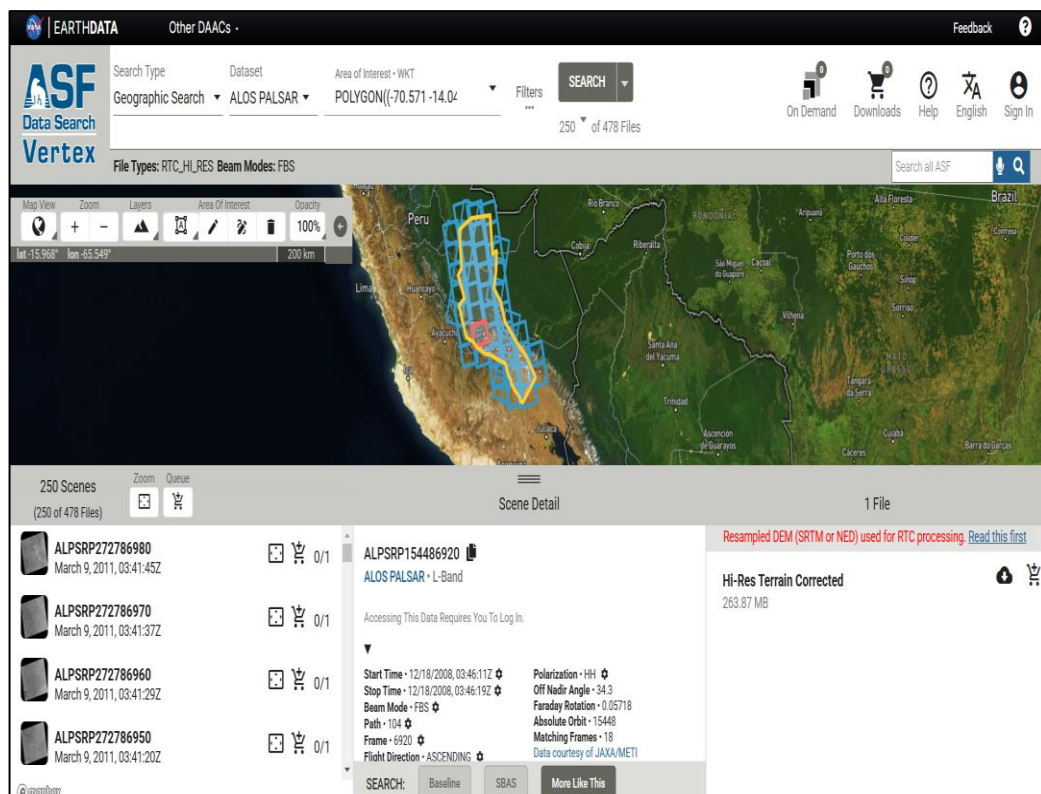
La elección del DEM de 30 m se fundamentó en su capacidad para representar con precisión la topografía compleja de la cuenca de estudio, caracterizada por pendientes pronunciadas y una red de drenaje densa. Esta resolución permite una adecuada discretización de subcuencas y parámetros hidrológicos en SWAT, como la dirección del flujo y el tiempo de concentración, aspectos clave en la simulación de la relación precipitación-escorrentía. Investigaciones previas en cuencas andinas (Ortiz, 2024) han demostrado que los DEM con esta resolución minimizan errores en la estimación de caudales en comparación con resoluciones más bajas. Además, su escala espacial es compatible con los datos de suelo y cobertura vegetal (Copernicus), garantizando coherencia en la modelación.

Para determinar la cantidad de DEMs requeridos, primero se delimitó la cuenca en Google Earth, lo que permitió definir el área de interés. Posteriormente, se importó el archivo de la cuenca en formato KML. Dado el tamaño del área de estudio, fue necesario descargar un total de 33 DEMs, los cuales se integraron en ArcGIS para generar un único modelo de elevación digital.

Este proceso es fundamental, ya que el modelo SWAT requiere un solo DEM para su análisis. La fusión de los datos permitió una delimitación precisa de la cuenca Vilcanota - Urubamba y el cálculo detallado de sus parámetros hidrológicos.

Figura 9.

Servidor Earth Data



Fuente. Tomado de (Earth Data - Alaska Satellite Facility de la NASA, 2024)

Figura 10.

DEM de la cuenca Vilcanota-Urubamba



Fuente. Tomado de (Earth Data - Alaska Satellite Facility de la NASA, 2024)

3.3.1.2 Información de Mapa de suelos

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó el Mapa Digital de Suelos del Mundo (DSMW) de la FAO/UNESCO, el cual fue descargado de la plataforma oficial de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Este mapa

proporciona información detallada sobre la distribución y clasificación de los suelos a nivel global.

El mapa de suelos de la FAO (HWSD) se seleccionó por su estandarización global y compatibilidad con modelos hidrológicos como SWAT. Proporciona parámetros edáficos esenciales (textura, conductividad hidráulica) validados con muestras de campo y bases de datos internacionales. Aunque su escala 1:5,000,000 es generalizada, estudios en cuencas andinas (Daneshvar et al., 2021) demuestran su eficacia para simular caudales. Adicionalmente, se complementó con la resolución del DEM (30 m) y la cobertura vegetal (Copernicus).

El DSMW es un recurso de acceso abierto que permite la descarga de datos geoespaciales en formato digital, facilitando su integración en sistemas de información geográfica (SIG) para su posterior análisis.

El programa utiliza una base de datos de suelos en Microsoft Access, pero esta información es limitada. Para obtener datos más completos, se puede descargar una base de datos global de tipos de suelos desde la página oficial de SWAT MODEL. Al iniciar el programa, es necesario reemplazar el archivo de Microsoft Access con la base de datos actualizada para asegurar un análisis más preciso y detallado.

Figura 11.

Portal de suelos de la FAO



Fuente. Tomado de (FAO, 2024)

4.3.1.3 Información de Mapa de uso de suelos

Se obtuvo información del mapa de uso de suelos de la cuenca a partir de la plataforma Global Land Cover. Esta fuente permite acceder a datos satelitales actualizados y de alta resolución, lo que facilita la caracterización del uso y cobertura del suelo en la zona de estudio. La información descargada será utilizada para el análisis hidrológico y la calibración del modelo SWAT, asegurando mayor precisión en la representación de los procesos naturales dentro de la cuenca.

El mapa Global Land Cover de 100 m (Copernicus) se seleccionó por su capacidad para representar la heterogeneidad de la cobertura vegetal en la cuenca de estudio, caracterizada por bosques fragmentados, cultivos y pastizales de montaña. Su resolución espacial equilibra detalle topográfico y eficiencia computacional, esencial para discretizar HRUs en SWAT. Estudios en cuencas andinas (Valencia et al., 2024) demuestran que resoluciones de 100 m mejoran la precisión en la simulación de caudales frente a productos más gruesos. Además, su metodología basada en Sentinel-1/Sentinel-2 garantizan su confiabilidad para analizar la relación precipitación-escorrentía.

El mapa de uso de suelo de Copernicus mitiga la nubosidad mediante la integración de imágenes Sentinel-1, activas y capaces de penetrar nubes, con datos ópticos de Sentinel-2, procesados con algoritmos de fusión temporal. Esta combinación garantiza cobertura continua y precisa, incluso en regiones tropicales lluviosas, asegurando datos confiables para parametrizar la cobertura vegetal en SWAT.

Figura 12.

Página de global land cover



Fuente. Tomado de (Global Land Cover, 2024)

Tabla 9.

Tipo de dato, resolución y fuente de datos

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Enlace
Datos Hidrometereológicos	Diaria (1981-2016)	SENAMHI/EGEMSA	http://www.senamhi.gob.pe/
DEM	30m x 30m	NASA	https://search.asf.alaska.edu/#/
Cobertura vegetal	100 m	Copernicus Global Land Cover	https://land.copernicus.eu/
Mapa de suelo	1:5 000 000	FAO	https://www.fao.org/soils-portal/en/

Fuente. Elaboración propia.

3.3.1.4 Información Hidrológica

Las estaciones meteorológicas que tienen información de precipitación, temperatura máxima y mínima que se encuentren dentro de la cuenca de estudio son las estaciones de Qorihuayrachina, Urubamba, Calca, Pisac, Caicay, Sicuani, Pomacanchi, Langui, Granja K'ayra, Ancachuro, Lucumachayoc, Machupicchu, Pacaymayo, Huayllabamba.

La información hidrológica utilizada en el estudio fue obtenida del Producto PISCO, una base de datos desarrollada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Este conjunto de datos proporciona información climática interpolada de alta resolución, incluyendo registros diarios y mensuales de precipitación y temperatura en todo el territorio peruano. La serie de datos abarca el período de 1981 a 2016 y ha sido generada a partir de observaciones de estaciones meteorológicas dentro de la cuenca de estudio, combinadas con métodos de interpolación espacial y datos de reanálisis.

El software R se empleó para procesar los datos de precipitación del producto PISCO, asegurando su calidad y compatibilidad con SWAT. Esto incluyó la extracción espacial de series temporales (diarios), corrección de valores faltantes mediante el método de interpolación lineal, usando cuando lo requiera otras estaciones cercanas e imputación con filtro de Kalman, eliminación de atípicos (datos extremos) y validación cruzada con estaciones locales. Los datos procesados se exportaron a SWAT en formato estándar (.txt), previa verificación gráfica y documentación de scripts para garantizar reproducibilidad. Este enfoque minimizó errores en la modelación hidrológica, evitando sesgos por datos faltantes o inconsistentes.

El uso del Producto PISCO en este estudio permite contar con una representación más homogénea y detallada de las condiciones climáticas en la cuenca de interés. Estos datos fueron procesados y adaptados para su integración en el modelo SWAT, asegurando que las simulaciones hidrológicas reflejen de manera más precisa la dinámica de precipitación y escorrentía en el área de estudio.

3.3.1.4.1 Análisis de consistencia de los datos de entrada de datos climáticos

Con el objetivo de garantizar la calidad y confiabilidad de los datos de entrada para el modelo hidrológico SWAT, se realizó un análisis de consistencia a la serie de precipitación proveniente del producto PISCO en la zona de estudio. Este análisis tuvo como finalidad identificar errores, valores atípicos y asegurar la coherencia temporal de los datos.

Regresión Simple - Prec PISCO vs. Prec Real

Variable dependiente: Prec PISCO

Variable independiente: Prec Real

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Minimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-0.964371	0.169202	-5.69953	0.0000
Pendiente	0.0327486	0.000165379	198.022	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	8994.91	1	8994.91	39212.77	0.0000
Residuo	7.34039	32	0.229387		
Total (Corr.)	9002.25	33			

Coeficiente de Correlación = 0.999592

R-cuadrada = 99.9185 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9159 por ciento

Error estándar del est. = 0.478944

Error absoluto medio = 0.395252

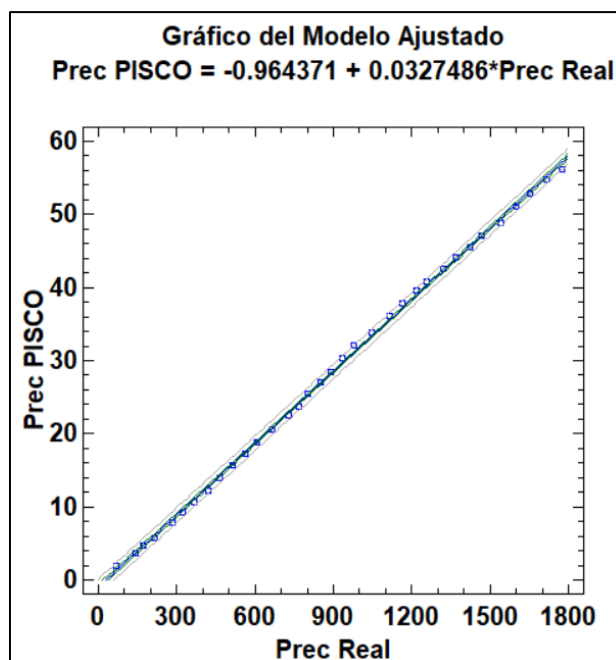
Estadístico Durbin-Watson = 0.381276 (P=0.0000)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.717913

El análisis arrojó un coeficiente de correlación de 0.99, lo que indica una altísima correlación lineal positiva entre ambas series. Además, el coeficiente de determinación R^2 fue de 99.92%, lo que significa que casi el 100% de la variabilidad en los datos de PISCO puede explicarse por los datos reales observados. El valor-p tanto del modelo como de los coeficientes individuales fue 0.00, confirmando la significancia estadística del modelo al nivel del 95%.

El error estándar de la estimación fue 0.48, y el residuo medio cuadrático (0.395252) sugiere un bajo nivel de dispersión. Sin embargo, el estadístico de Durbin-Watson de 0.381276 indica autocorrelación positiva en los residuos, lo cual podría estar asociado a la estructura temporal de los datos.

A pesar de esta autocorrelación, debido a la alta correlación y significancia estadística, los datos del producto PISCO se consideran estadísticamente consistentes y válidos para ser empleados como insumo en la calibración del modelo hidrológico SWAT. Esto se refuerza por su coherencia con los registros de las estaciones K'ayra y Pisac, utilizados como referencia para la validación cruzada.



3.3.2 Softwares utilizados.

Tabla 10.

Softwares utilizados

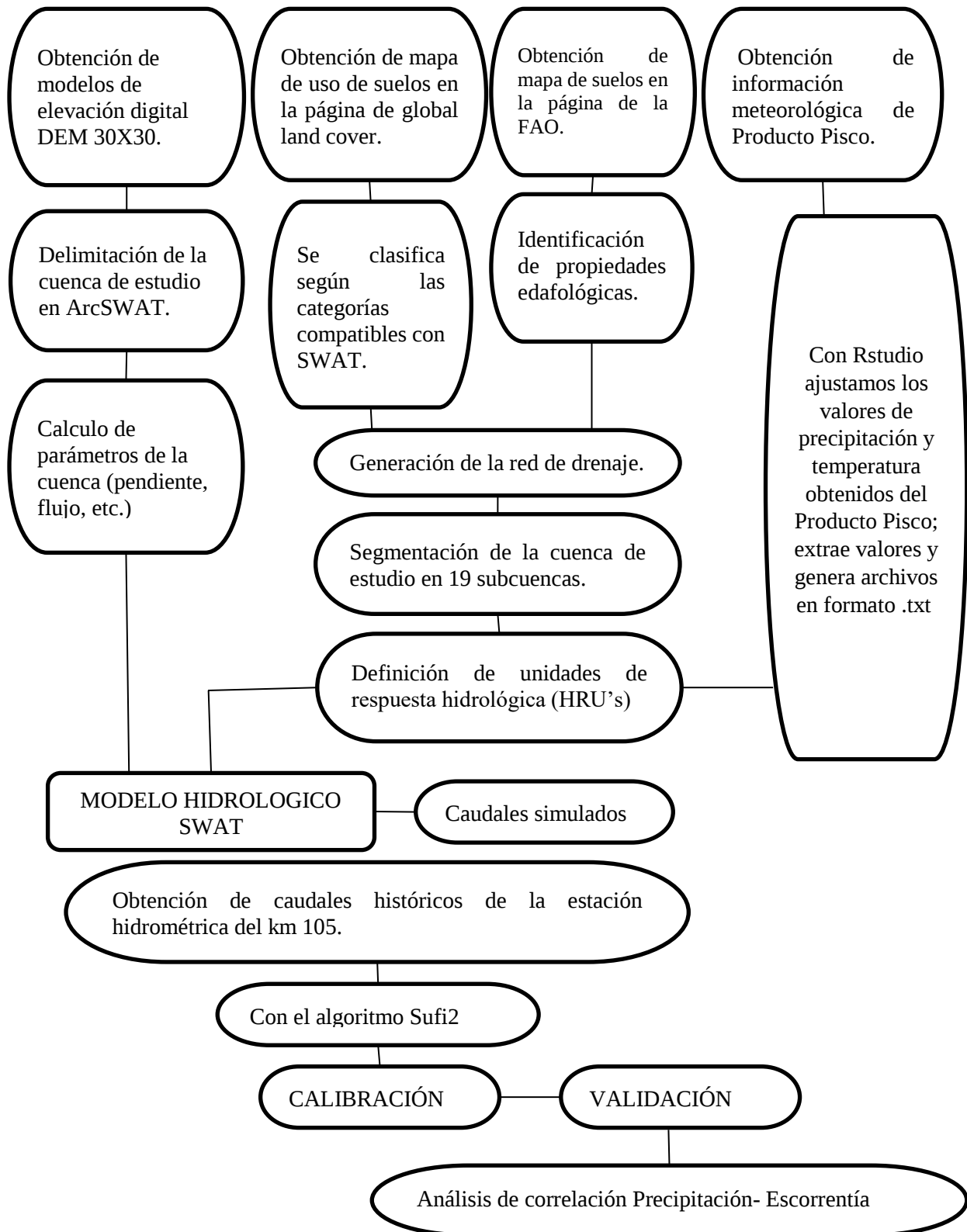
SOFTWARE	DEFINICIÓN	USO
----------	------------	-----

WORD	Es un procesador de texto ampliamente utilizado para la redacción, edición y formateo de documentos. Permite la inserción de tablas, gráficos, referencias y citas bibliográficas, facilitando la estructuración de informes académicos	Se empleará para la redacción del documento final, organizando la información en capítulos y agregando figuras, tablas y referencias.
MS EXCEL	Software de hojas de cálculo que permite organizar, analizar y visualizar datos a través de funciones matemáticas, estadísticas y herramientas gráficas. Es útil para manejar grandes volúmenes de información y realizar cálculos automatizados.	Se utilizará para organizar datos climáticos e hidrológicos, procesar series temporales de precipitación y escorrentía, y generar gráficos de tendencias.
MICROSOFT ACCES	Sistema de gestión de bases de datos que facilita el almacenamiento y manipulación de información estructurada, permitiendo consultas y relaciones entre distintos conjuntos de datos. Es útil cuando se manejan grandes volúmenes de información.	Se empleará para administrar bases de datos de parámetros hidrológicos, suelos, vegetación y otros insumos requeridos por SWAT.
GOOGLE EARTH	Plataforma de visualización cartográfica que permite explorar imágenes satelitales, visualizar modelos de elevación y realizar mediciones espaciales. Facilita la identificación de áreas de estudio y la extracción de coordenadas geográficas.	Se utilizará para la delimitación preliminar de la cuenca, la exportación de archivos KML y la comparación de resultados con imágenes satelitales.
ARCGIS	Software especializado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permite la manipulación, análisis y representación de datos espaciales. Es fundamental en estudios ambientales, de ordenamiento territorial y modelamiento hidrológico.	Se empleará para procesar mapas de elevación, uso de suelo e hidrografía, generando capas georreferenciadas que servirán como insumos para SWAT.

SWAT- ARCSWAT	Modelo hidrológico que permite simular el comportamiento de una cuenca hidrográfica bajo diferentes escenarios de precipitación y cobertura del suelo. Es ampliamente utilizado en estudios de gestión del agua y cambio climático; es una extensión del Arcgis.	Se utilizará para modelar la relación precipitación-escorrentía, evaluar los caudales simulados y analizar el impacto del uso del suelo en el régimen hidrológico.
R estudio	Entorno de programación en R utilizado para el análisis de datos, modelado estadístico y visualización gráfica. Es una herramienta potente para realizar análisis cuantitativos y evaluación del desempeño de modelos.	Se empleará para evaluar la precisión del modelo SWAT mediante indicadores estadísticos, realizar análisis de sensibilidad y graficar resultados hidrológicos.
SWAT OUTPUT	SWAT Output es una herramienta que permite visualizar y analizar los resultados generados por el modelo SWAT en ArcSWAT. Facilita la interpretación de los archivos de salida del modelamiento hidrológico, mostrando datos de caudal, sedimentos, nutrientes y otros parámetros a nivel de cuenca, subcuenca y HRU	Se utilizó para leer y analizar los resultados del modelamiento en ArcSWAT, verificando la escorrentía generada, los caudales simulados y otros procesos hidrológicos. Esto permitió evaluar el comportamiento del agua en la cuenca Vilcanota-Urubamba y ajustar la calibración del modelo.
SWAT-CUP	Herramienta de calibración y validación del modelo SWAT que permite optimizar sus parámetros a través de algoritmos de ajuste. Ayuda a mejorar la precisión de las simulaciones hidrológicas comparándolas con datos observados.	Se utilizará para calibrar y validar el modelo, ajustando los parámetros clave para reducir la incertidumbre en la simulación de caudales.

Fuente. Elaboración propia.

3.3.3 Flujograma de la investigación.

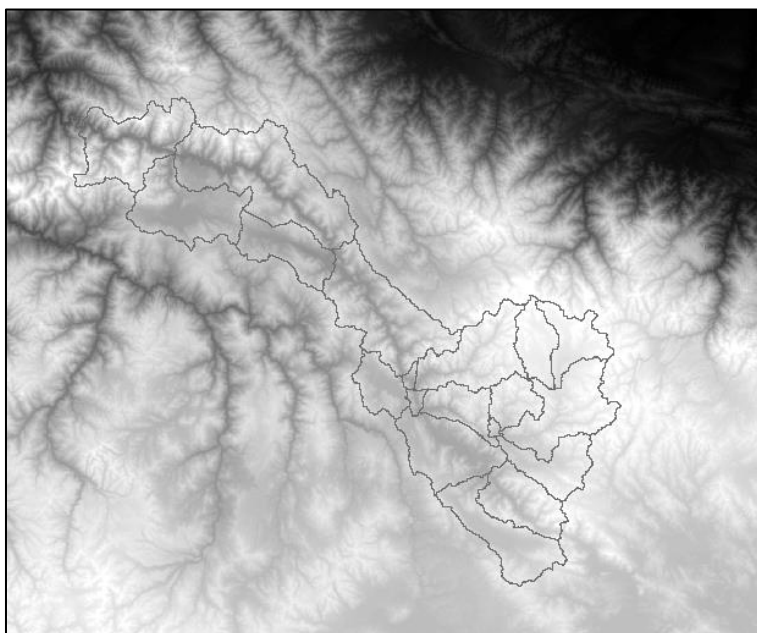


3.4 Metodología de procesamiento de datos

3.4.1 Determinación del Modelo digital de elevación

Antes de iniciar el modelamiento hidrológico, se requiere la integración del modelo SWAT con ArcGIS mediante la extensión ArcSWAT, lo que permite gestionar información geoespacial y realizar un análisis hidrológico detallado de la cuenca. En ArcSWAT se incorporó el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca Vilcanota-Urubamba, con una resolución de 30.0 m x 30.0 m. este DEM define la topografía y los límites de la cuenca, es esencial ya que representa con alta precisión la morfología del terreno y permite definir los límites de la cuenca con base en la dirección del flujo superficial. Durante este proceso, se generó una máscara espacial para restringir el análisis exclusivamente al área de estudio, optimizando así los recursos computacionales y reduciendo los tiempos de procesamiento.

Figura 13.
DEM de 30m.



Fuente. *Elaboración propia*

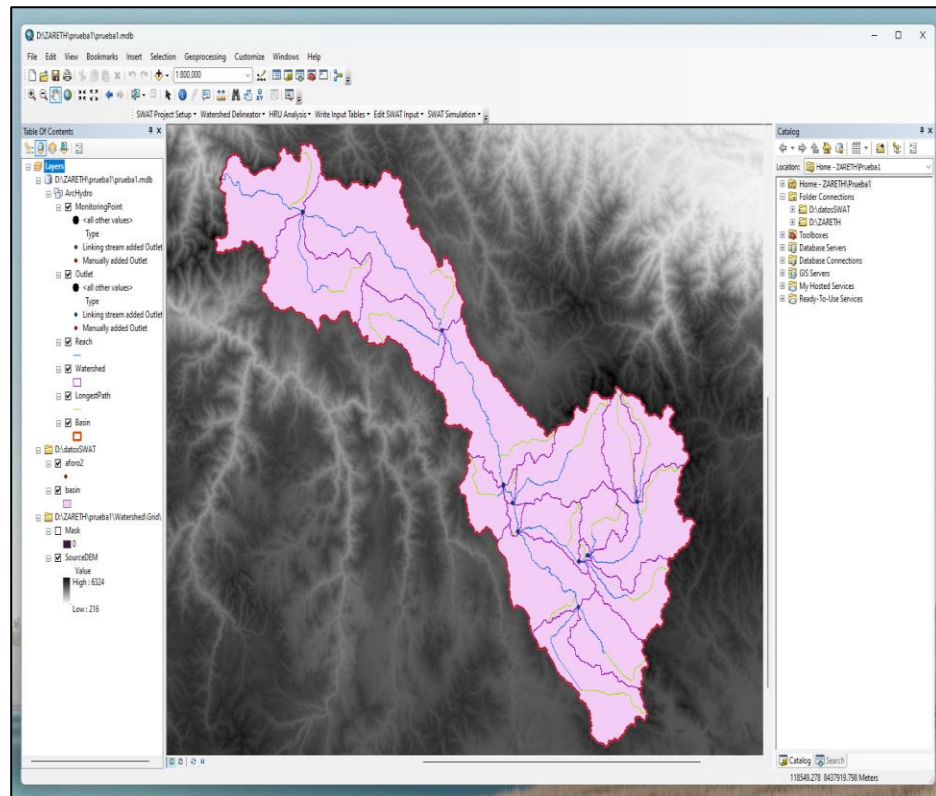
Posteriormente, se realizó la generación de la red de drenaje, estableciendo un umbral de área de 20,000 ha para la delimitación de subcuencas, lo que permitió segmentar la cuenca en 19 unidades hidrográficas. Este procedimiento es fundamental, ya que define la estructura del sistema hidrológico y facilita la modelización de la dinámica del flujo en el territorio.

Una vez delimitada la cuenca, se definió el punto de salida en el km 105, con coordenadas $13^{\circ}10'00''$ S y $72^{\circ}32'00''$ O, donde se ubica la estación hidrométrica de EGEMSA. La selección de este punto responde a su relevancia como sitio de control, ya que el modelamiento hidrológico comprende la totalidad de la cuenca Vilcanota-Urubamba hasta este sector, lo que permite evaluar el comportamiento del caudal en función de los registros hidrométricos disponibles.

Finalmente, utilizando el punto de salida previamente definido, se consolidó la delimitación de la cuenca de estudio, permitiendo la caracterización de sus parámetros hidrológicos y estableciendo la base para la posterior simulación del ciclo hidrológico mediante SWAT.

Figura 14.

Delimitación de la cuenca de estudio.



Fuente. *Elaboración propia.*

3.4.2 Determinación del uso y tipo de suelo

Una vez delimitada la cuenca de estudio y definidos sus parámetros hidrológicos, se procede a la generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en ArcSWAT donde se incorporó la información de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente, input's clave para la caracterización de la cuenca de estudio.

El SWAT modela la cuenca dividiéndola en Subcuencas y HRUs (Hydrologic Response Units), donde cada HRU es una combinación única de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente.

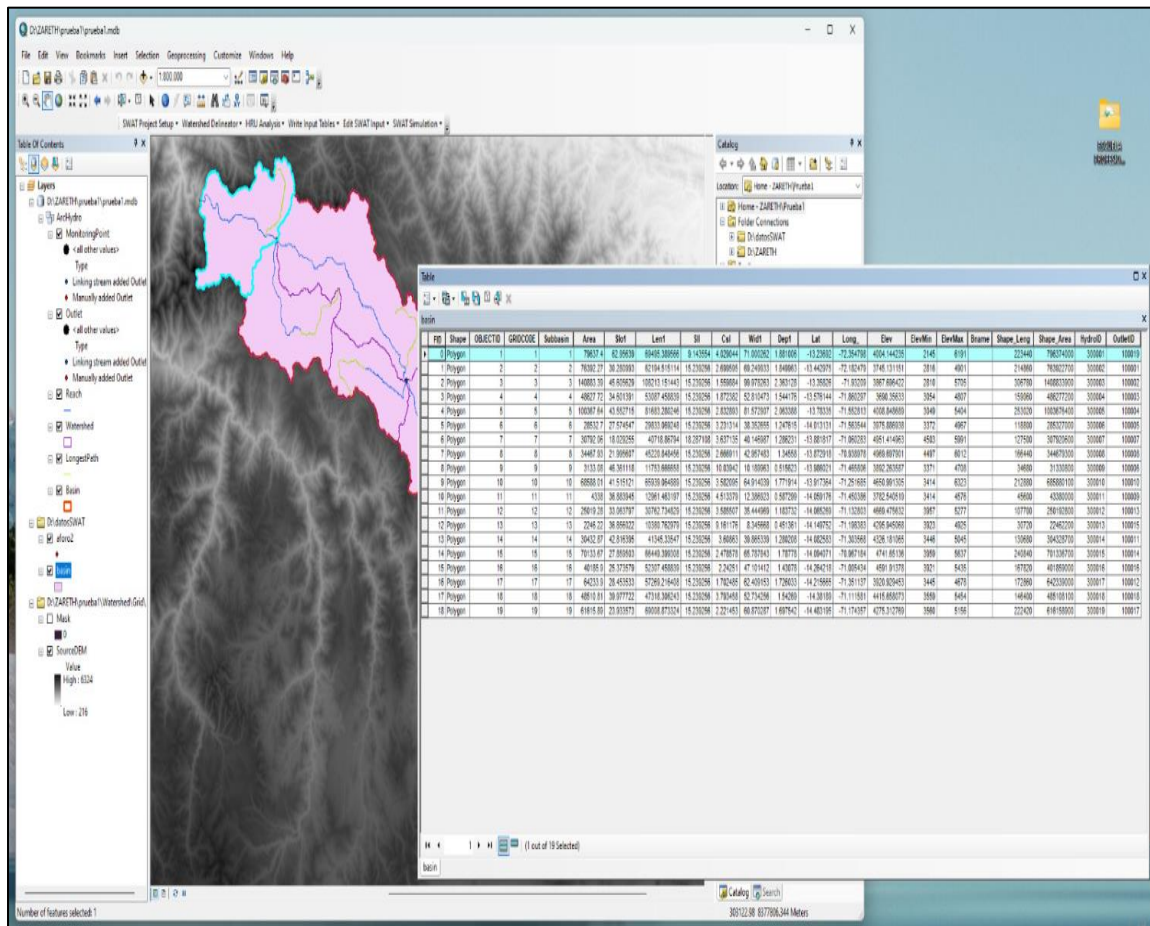
Subcuencas de la Cuenca de Estudio

Mediante el módulo SWAT "Divide Basins", la cuenca principal se subdividió en 19 subcuencas. Se generó un cuadro resumen con áreas, elevaciones medias y coordenadas geográficas de cada subcuenca.

Punto de aforo

Se georreferenció la estación hidrométrica del Km 105 en coordenadas WGS84 y se importó al modelo SWAT como punto de salida, vinculando datos observados de caudal para calibración.

Figura 15.
Punto de aforo



Fuente. *Elaboración propia*

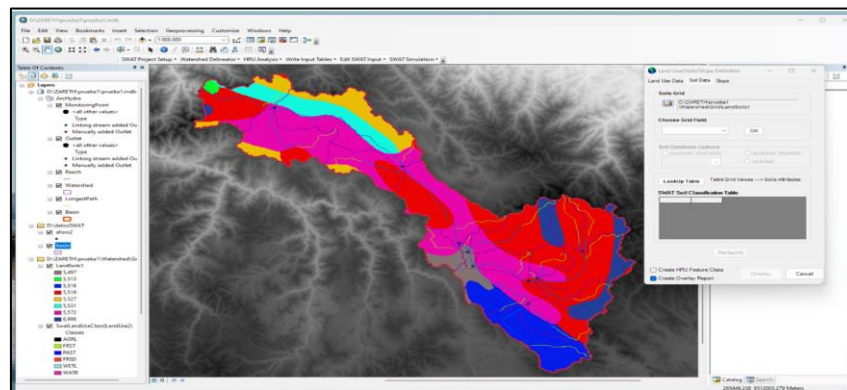
La información de uso del suelo fue obtenida de la base de datos de Global Land Cover, estos datos influyen en evapotranspiración y escorrentía.

Los datos de tipo de suelo fueron extraídos del portal de la FAO por sus siglas en ingles que significan Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, estos datos definen la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo.

Mapa de uso de suelos

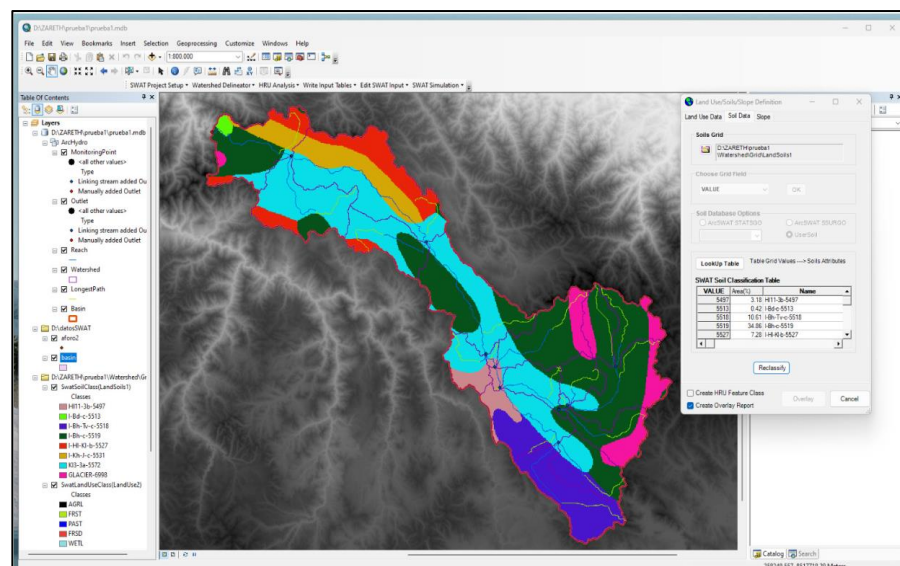
Se elaboró un mapa de cobertura vegetal mediante imágenes satelitales y validación de campo, identificando usos dominantes como agricultura, pastizales y áreas urbanas.

Figura 16.
Mapa de uso de suelos



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 17.
Mapa de suelos con la tabla de reclasificación de la nomenclatura

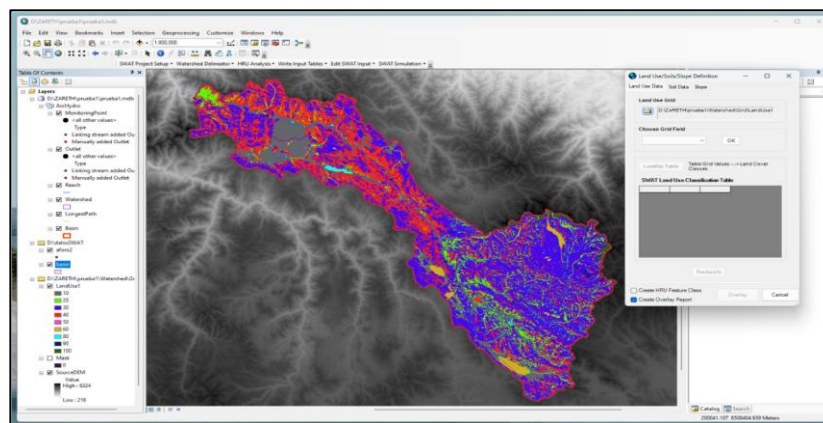


Fuente. *Elaboración propia*

Mapa de suelos

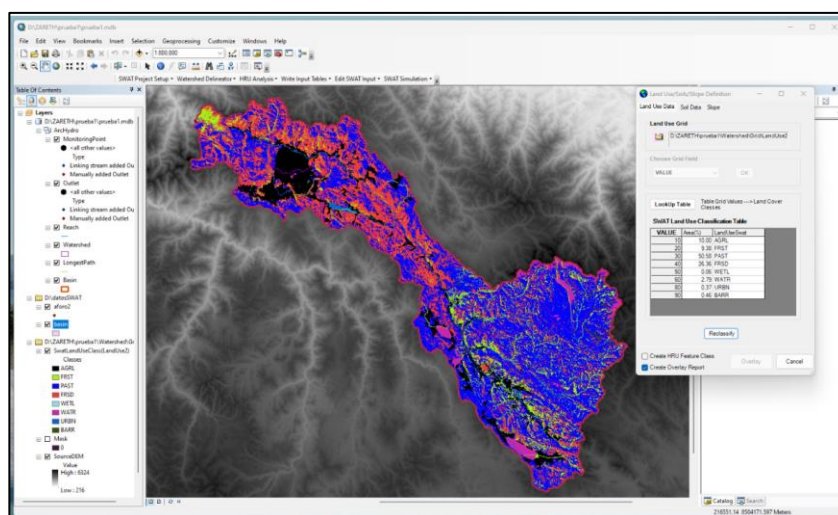
Se procesaron datos edafológicos oficiales en GIS, ajustando resolución y proyección. El resultado fue un mapa de suelos clasificados por textura y grupo hidrológico para la cuenca.

Figura 18.
Mapa de suelos



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 19.
Mapa de uso suelos con la tabla de reclasificación de la nomenclatura



Fuente. *Elaboración propia*

Adicionalmente, los valores de pendiente fueron derivados del Modelo Digital de Elevación (DEM), permitiendo una representación detallada de las condiciones fisiográficas de la cuenca para su posterior modelización hidrológica.

Dado que ArcSWAT opera con una base de datos estructurada, es fundamental asegurar la correcta integración de los insumos de entrada, particularmente en lo que respecta a uso y tipo de suelo, para garantizar la adecuada interpretación por parte del software. En este sentido, los datos provenientes de Global Land Cover utilizan una codificación numérica, mientras que SWAT emplea una nomenclatura propia para procesar esta información. A continuación, se presentan las equivalencias entre ambos sistemas.

Tabla 11.

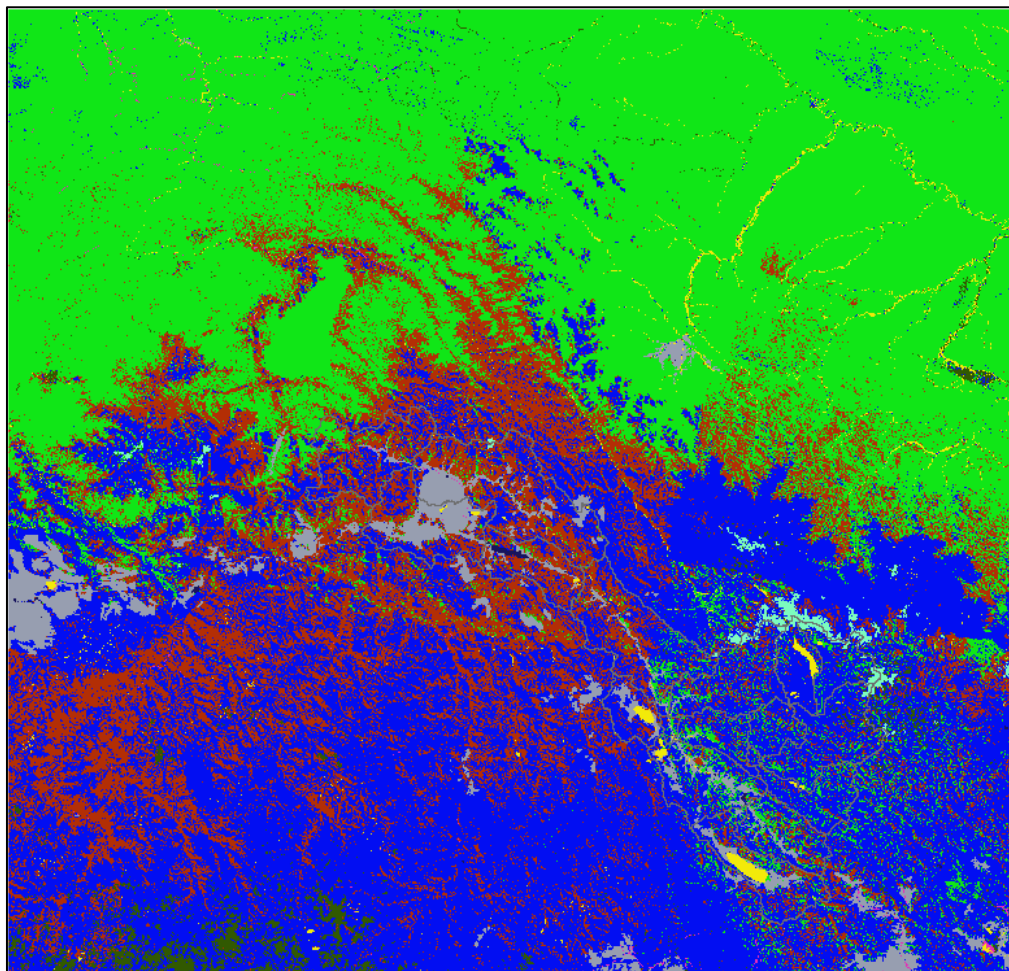
Equivalencias de uso de suelos entre ambos sistemas

Código SWAT	Descripción	Código FAO sugerido
AGRL	Agricultura	1
FRST	Bosque	3
PAST	Pastizales	2
FRSD	Bosque degradado o fragmentado	3
WETL	Humedal	4
WATR	Agua (cuerpos de agua)	5 o 8
URBN	Área urbana	6
BARR	Terreno desnudo / rocoso	7

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 20.

Uso de suelo



Fuente. *Elaboración propia*

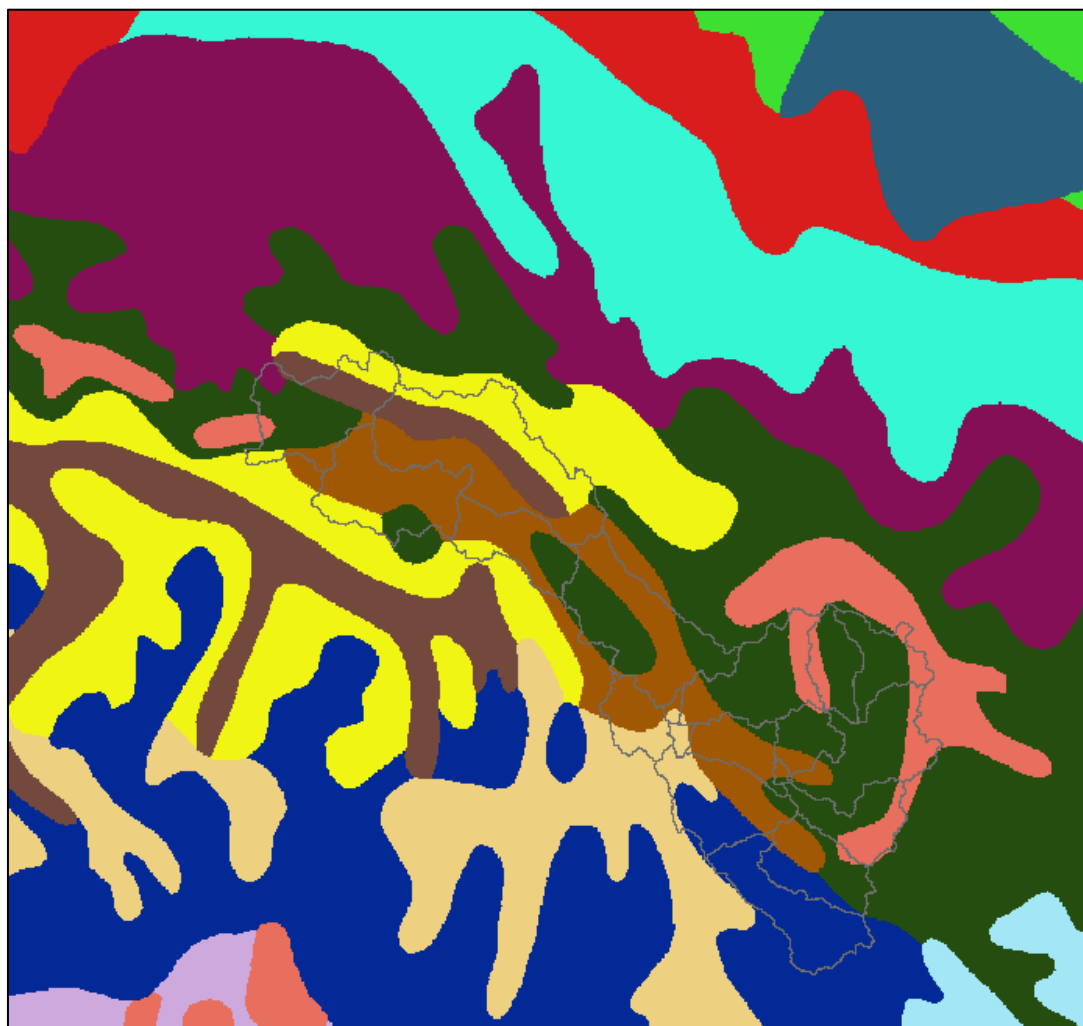
De manera similar, esto también aplica a los datos del tipo de suelo. En la base de datos obtenida, se registraron 4,933 entradas, por lo que no es posible mencionarlas todas individualmente. A continuación, se presentan algunas de las equivalencias entre ambos sistemas:

Tabla 12.*Equivalencias de tipos de suelos entre ambos sistemas*

Código SWAT		Descripción de tipo de suelo	Código FAO sugerido	Categoría FAO
HI11-3b-5497	Bosque húmedo o denso	Suelo hístico (orgánico saturado, probablemente turba)	3	Bosques
I-Bd-c-5513	Tierra agrícola de cultivos	Inceptisol de bajo drenaje con textura arcillosa	1	Tierras cultivadas
I-Bh-Tv-c-5518	Agricultura + vegetación secundaria	Inceptisol con horizonte B húmico y textura variable	1 o 2	Cultivos / Pastizales
I-Bh-c-5519	Tierra agrícola	Inceptisol con horizonte B húmico de textura arcillosa	1	Tierras cultivadas
I-HI-KI-b-5527	Bosque andino	Inceptisol hístico influenciado y kándico con textura limosa	3	Bosques
I-Kh-J-c-5531	Vegetación intervenida / cultivos	Inceptisol con horizonte kándico, joven, de textura arcillosa	1 o 2	Cultivos o Pastizales
Kl3-3a-5572	Matorrales o cobertura natural	Litosol (suelos muy poco desarrollados sobre roca)	2	Pastizales o vegetación herbácea
GLACIER-6998	Glaciar	Glaciar (hielo permanente)	7	Glaciares

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 21.
Tipos de Suelo FAO



Fuente. *Elaboración propia*

Una vez verificada nuestra información con la base de datos del SWAT, se ingresará la información sobre el uso de suelo, la cual será reclasificada según la nomenclatura utilizada por SWAT, como se detalla en la Tabla 11.

De manera similar, en la sección correspondiente al tipo de suelo se cargará la información y se reclasificará utilizando los valores predefinidos en la base de datos del SWAT,

como se detalla en la Tabla 12, asegurando así la compatibilidad y correcta lectura de los datos por el modelo.

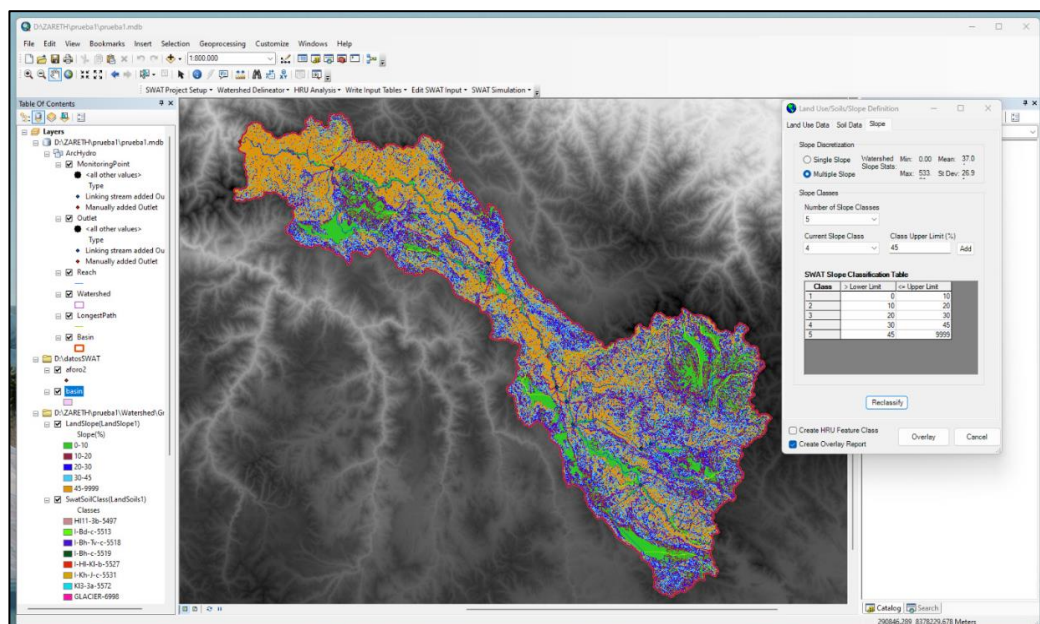
Finalmente se definió la información de la pendiente del terreno. En esta etapa, se puede optar por un único valor de pendiente (pendiente simple) o dividir el terreno en rangos de pendiente (pendiente discretizada).

Mapa de pendientes

A partir del DEM, se calculó un mapa de pendientes clasificadas en intervalos (0-10%, 10-20%, etc.), clave para definir procesos de escorrentía e infiltración.

Figura 22.

Mapa de pendientes



Fuente. *Elaboración propia*

Para esta investigación, se eligió la discretización de pendientes, ya que se recomienda trabajar con múltiples categorías para una mejor representación del relieve. En este caso, se establecieron cinco rangos de pendiente, los cuales son los siguientes:

Tabla 13.

Rangos de pendientes

CLASE	> LIMITE INFERIOR	<= LIMITE SUPERIOR
1	10	20
2	20	30
3	30	40
4	40	45
5	45	< a 45

Fuente. *Elaboración propia*

Se generó un total de 1,416 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's), las cuales servirán para el análisis hidrológico en el modelo SWAT.

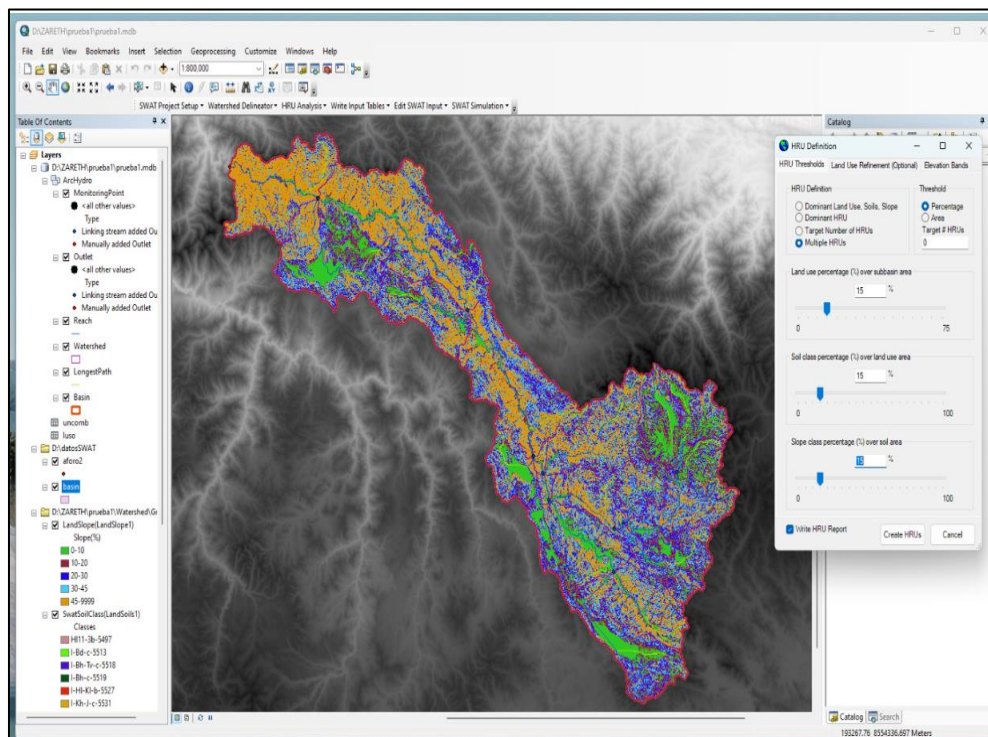
Una vez completado este proceso, procedemos a definir las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's). En esta etapa, es importante identificar y eliminar valores no representativos o inconsistencias en los datos, conocidos como "ruidos" en la cuenca. Para ello, se filtran y eliminan aquellas áreas que representan menos del 10% de la cuenca, asegurando que solo se consideren las zonas con mayor relevancia en el análisis hidrológico.

Umbrales de exclusión

Se definieron umbrales mínimos del 10% de área para uso de suelo para eliminar HRU poco representativas, simplificando el modelo sin perder precisión hidrológica.

Figura 23.

Aplicación de umbrales de exclusión



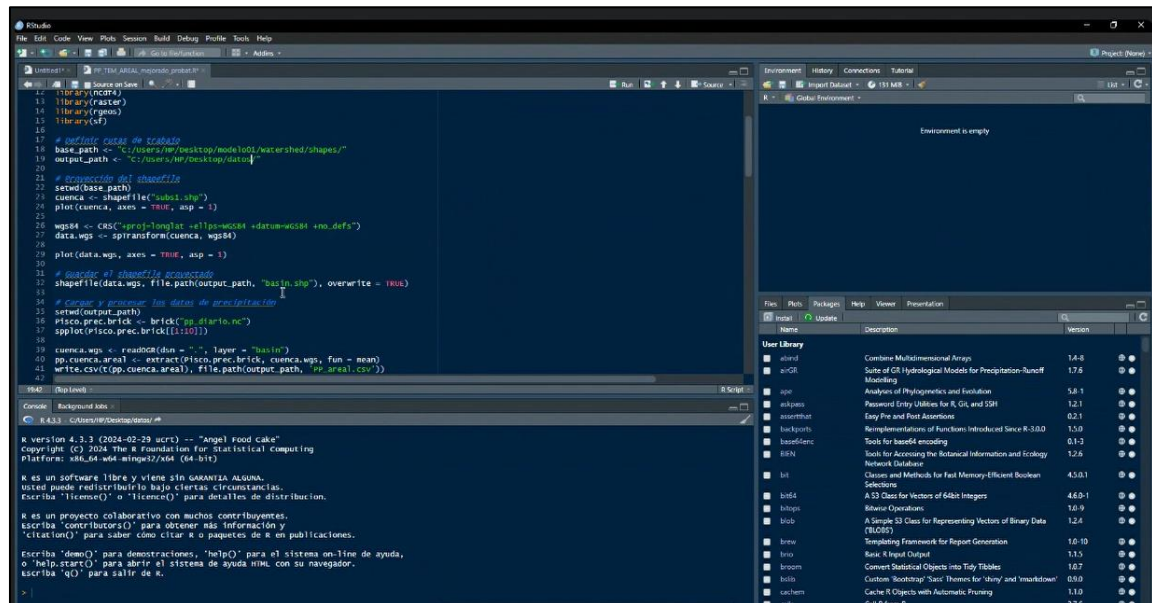
Fuente. *Elaboración propia*

3.4.3. Determinación de datos climatológicos

Se empleó el software R para el procesamiento y transformación de los datos de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima descargados del producto PISCO, estos datos son útiles para calcular escorrentía y balance hídrico.

Figura 24.

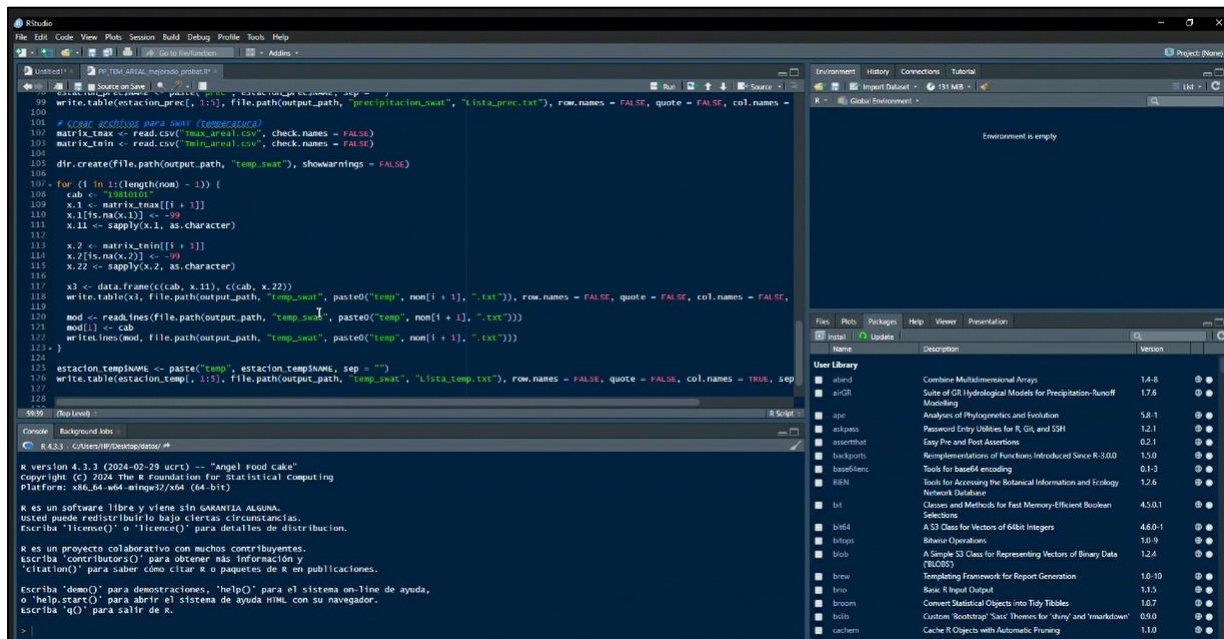
Interfaz del software R



Fuente. *Elaboración propia*

Estos datos, en su formato original, fueron sometidos a un proceso de homogeneización y ajuste mediante scripts desarrollados en R, con el fin de garantizar su compatibilidad con los requisitos de entrada del modelo SWAT. Adicionalmente, se generaron series temporales específicas de precipitación y temperatura para cada una de las 19 subcuencas previamente delimitadas, utilizando el archivo shapefile de la delimitación hidrológica como insumo en R. Este proceso incluyó la interpolación espacial, la corrección de valores atípicos y la generación de series temporales continuas, lo que permitió la integración eficiente de los datos climáticos en el modelo hidrológico para su posterior análisis y simulación.

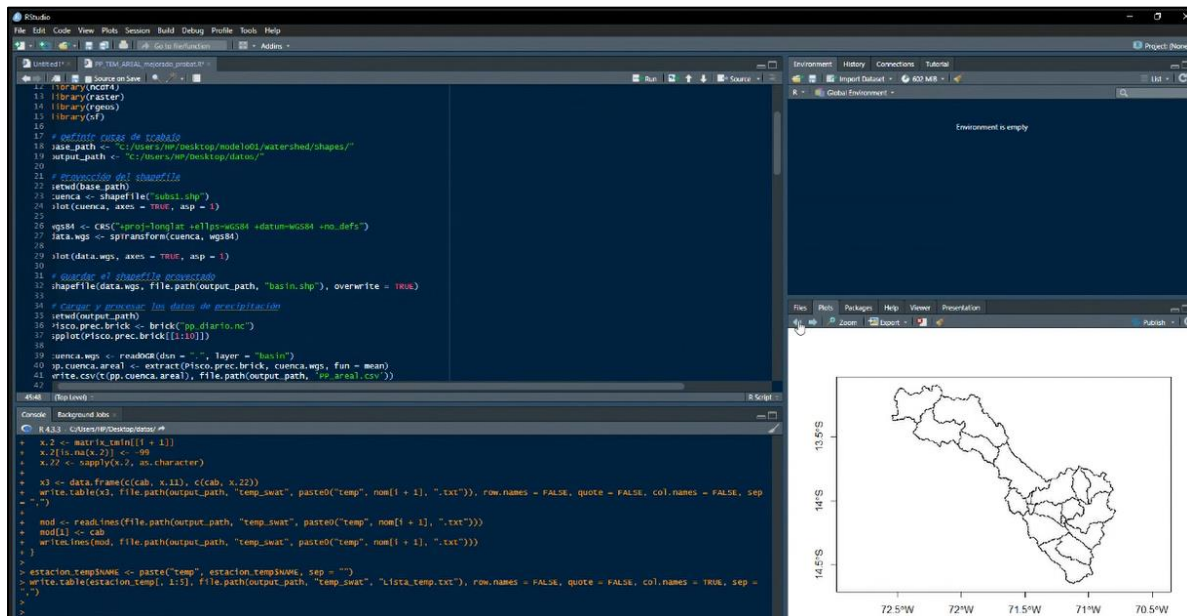
Figura 25.
Script insertado al programa R para su ejecución



Fuente. *Elaboración propia*

Los datos meteorológicos requeridos como insumos para la implementación del modelo SWAT incluyen variables clave como temperatura (mínima y máxima), precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. No obstante, para la ejecución del modelo, únicamente son estrictamente necesarios la precipitación y la temperatura, ya que el SWAT cuenta con una base de datos internos que le permite simular los demás parámetros climáticos de manera autónoma. Este enfoque reduce la dependencia de datos externos y facilita la aplicación del modelo en regiones con información climática limitada. Una vez obtenidos y procesados los datos meteorológicos, el programa genera tablas estructuradas que organizan la información en formatos compatibles con el modelo, asegurando una integración eficiente y precisa.

Figura 26,
Visualización de la cuenca de estudio en la interfaz de R



Fuente. *Elaboración propia*

Los datos meteorológicos se introdujeron para un período histórico comprendido entre el 01/01/1981 y el 31/12/2016, abarcando así un intervalo de 36 años que permite capturar la variabilidad climática de la zona de estudio. Por otro lado, los datos de caudales se configuraron en una resolución temporal diaria, lo que garantiza un análisis detallado de la dinámica hidrológica. Adicionalmente, se implementó un período de calentamiento (warm-up) de 3 años, el cual es fundamental para estabilizar las condiciones iniciales del modelo y minimizar posibles sesgos en las simulaciones, asegurando que los resultados reflejan de manera fidedigna los procesos hidrológicos.

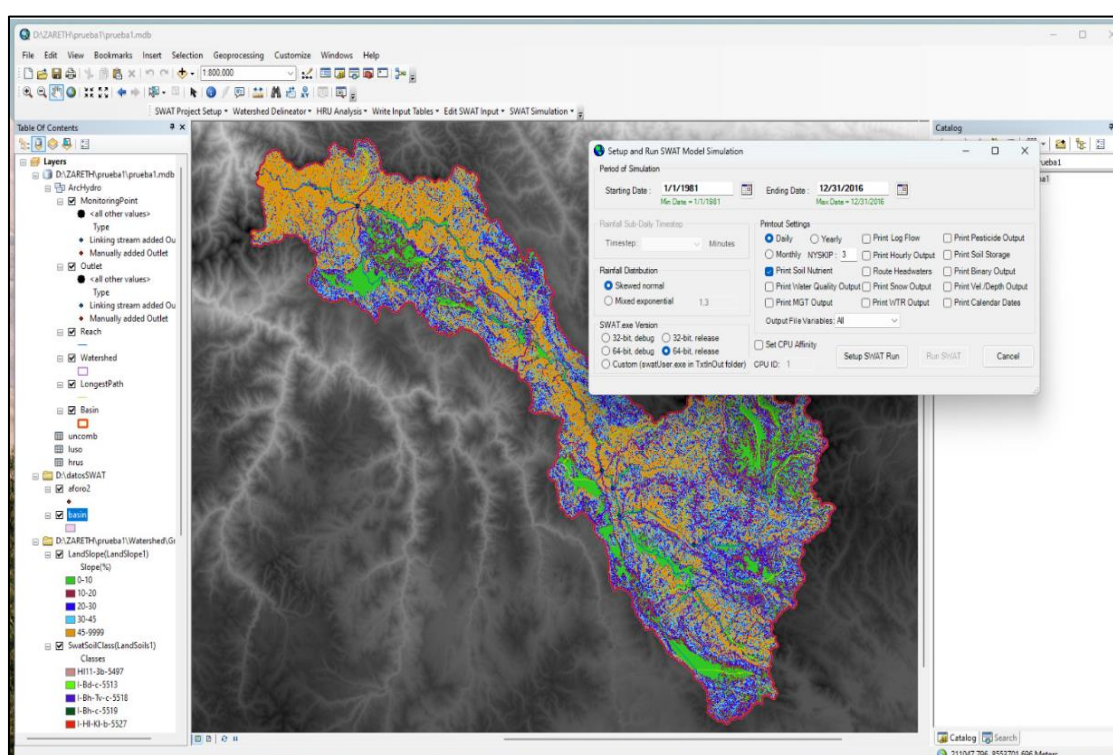
Configuración de datos para simulación

Se definió el período de simulación (calentamiento, calibración) y métodos de enrutamiento hidrológico, configurando parámetros iniciales en las tablas SWAT.

Una vez completados todos los procesos de preparación, incluyendo la validación y verificación de los datos de entrada, el modelo SWAT se encuentra listo para su ejecución. Este proceso culmina con la puesta en marcha del modelo, el cual realiza simulaciones hidrológicas integrales basadas en los datos proporcionados, permitiendo evaluar el comportamiento de la cuenca bajo diferentes condiciones climáticas.

Figura 27.

Configuración de datos para simulación



Fuente. *Elaboración propia*

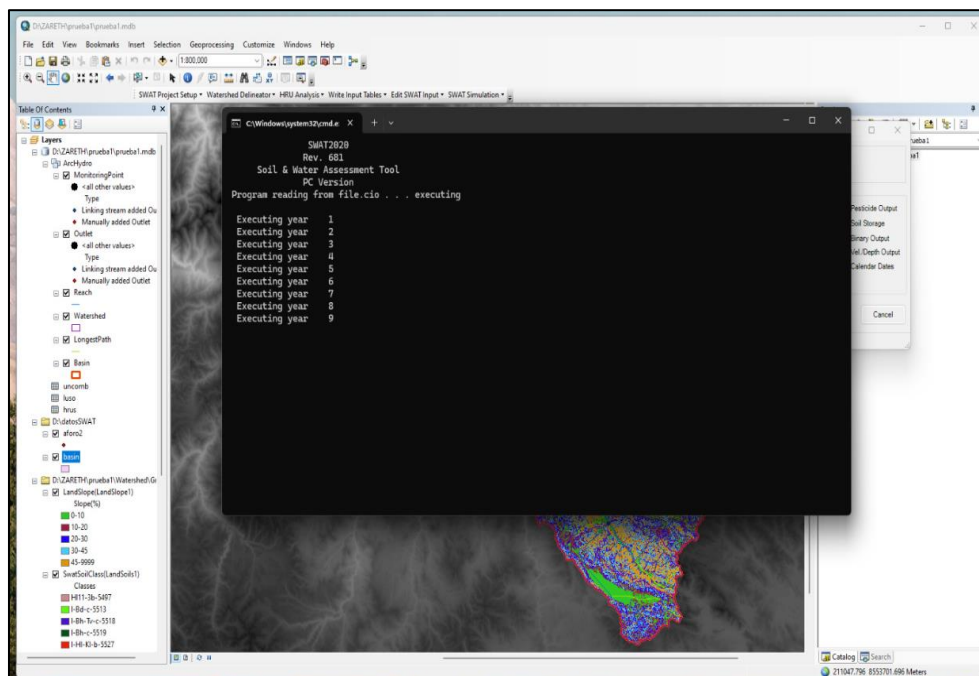
Se definió el período de simulación del modelo SWAT abarcando los años 1983-2016, asignando los tres primeros años (1981-1983) como fase de calentamiento para reducir la influencia de condiciones iniciales desconocidas. Además, los registros de la descarga media diaria de la estación hidrológica “KM 105” se emplearon como referencia para la calibración del modelo (1984-2005) y su posterior validación (2006-2016).

Ejecución de la simulación

Se ejecutó el modelo SWAT, monitoreando posibles errores en archivos de salida. Se generaron resultados brutos de caudal, sedimentos y parámetros hidrológicos.

Figura 28.

Ejecución de la simulación



Fuente. *Elaboración propia*

3.5 Salida de datos de simulación del modelo

Para el análisis de los resultados obtenidos de la simulación del modelo SWAT, se utilizó el programa SWAT Output Viewer. Este software permite visualizar y procesar de manera eficiente los archivos de salida generados por el SWAT, facilitando la interpretación de los datos hidrológicos simulados. Una vez finalizada la ejecución del modelo SWAT, se generó un archivo de resultados que fue importado al SWAT Output Viewer. Dentro de este programa, se procedió a ejecutar nuevamente la simulación para obtener una visualización detallada de los caudales generados en cada una de las subcuencas definidas en el modelo.

En este proceso, se prestó especial atención a la primera subcuenca, ya que en esta se encuentra ubicado el punto de aforo correspondiente a la estación hidrométrica del Km 105. Esta estación, que registra caudales observados de manera continua, proporcionó los datos de referencia necesarios para comparar y validar los caudales simulados por el modelo. La selección de esta subcuenca fue fundamental, ya que permitió evaluar la precisión del modelo en un punto específico de la red hidrológica, asegurando que los resultados fueran representativos de las condiciones reales de la cuenca.

Figura 29.

Caudales simulados

watout.dat: Bloc de notas									
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
Year	Day	Step	FLOWm ³ /s	SEDmg/L	ORGNmg/L	ORGPmg/L	NO3mg/L	NH3mg	
1984	1	0	0.759E+02	0.172E+03	0.177E+02	0.327E+01	0.138E+00	0.475	
1984	2	0	0.755E+02	0.184E+03	0.174E+02	0.308E+01	0.152E+00	0.599	
1984	3	0	0.664E+02	0.162E+03	0.129E+02	0.217E+01	0.196E+00	0.562	
1984	4	0	0.758E+02	0.172E+03	0.107E+02	0.195E+01	0.238E+00	0.431	
1984	5	0	0.863E+02	0.183E+03	0.101E+02	0.182E+01	0.258E+00	0.367	
1984	6	0	0.125E+03	0.224E+03	0.231E+02	0.447E+01	0.208E+00	0.566	
1984	7	0	0.129E+03	0.230E+03	0.219E+02	0.414E+01	0.219E+00	0.602	
1984	8	0	0.123E+03	0.220E+03	0.187E+02	0.347E+01	0.246E+00	0.562	
1984	9	0	0.112E+03	0.211E+03	0.134E+02	0.240E+01	0.290E+00	0.460	
1984	10	0	0.108E+03	0.215E+03	0.852E+01	0.149E+01	0.330E+00	0.324	
1984	11	0	0.134E+03	0.227E+03	0.167E+02	0.323E+01	0.287E+00	0.391	
1984	12	0	0.127E+03	0.226E+03	0.141E+02	0.268E+01	0.298E+00	0.384	
1984	13	0	0.108E+03	0.215E+03	0.962E+01	0.180E+01	0.326E+00	0.306	
1984	14	0	0.104E+03	0.207E+03	0.823E+01	0.167E+01	0.326E+00	0.229	
1984	15	0	0.903E+02	0.192E+03	0.462E+01	0.899E+00	0.333E+00	0.159	
1984	16	0	0.813E+02	0.184E+03	0.287E+01	0.518E+00	0.328E+00	0.113	
1984	17	0	0.760E+02	0.184E+03	0.199E+01	0.333E+00	0.321E+00	0.809	
1984	18	0	0.785E+02	0.178E+03	0.365E+01	0.650E+00	0.299E+00	0.115	
1984	19	0	0.825E+02	0.186E+03	0.560E+01	0.105E+01	0.278E+00	0.161	
1984	20	0	0.109E+03	0.205E+03	0.113E+02	0.224E+01	0.251E+00	0.272	
1984	21	0	0.102E+03	0.204E+03	0.967E+01	0.178E+01	0.262E+00	0.315	
1984	22	0	0.897E+02	0.190E+03	0.663E+01	0.115E+01	0.287E+00	0.279	
1984	23	0	0.843E+02	0.191E+03	0.389E+01	0.648E+00	0.322E+00	0.190	
1984	24	0	0.136E+03	0.230E+03	0.281E+02	0.625E+01	0.268E+00	0.282	
1984	25	0	0.129E+03	0.229E+03	0.142E+02	0.291E+01	0.288E+00	0.284	
1984	26	0	0.127E+03	0.226E+03	0.112E+02	0.217E+01	0.303E+00	0.288	
1984	27	0	0.225E+03	0.292E+03	0.356E+02	0.760E+01	0.195E+00	0.534	
1984	28	0	0.264E+03	0.308E+03	0.371E+02	0.762E+01	0.172E+00	0.637	
1984	29	0	0.248E+03	0.299E+03	0.378E+02	0.742E+01	0.178E+00	0.733	
1984	30	0	0.194E+03	0.273E+03	0.285E+02	0.535E+01	0.231E+00	0.699	
1984	31	0	0.196E+03	0.276E+03	0.266E+02	0.528E+01	0.253E+00	0.598	
1984	32	0	0.303E+03	0.330E+03	0.558E+02	0.131E+02	0.191E+00	0.384	
1984	33	0	0.246E+03	0.308E+03	0.279E+02	0.607E+01	0.250E+00	0.408	
1984	34	0	0.210E+03	0.285E+03	0.173E+02	0.355E+01	0.289E+00	0.362	
1984	35	0	0.237E+03	0.297E+03	0.380E+02	0.854E+01	0.282E+00	0.307	
1984	36	0	0.189E+03	0.267E+03	0.127E+02	0.269E+01	0.346E+00	0.212	
1984	37	0	0.166E+03	0.256E+03	0.479E+01	0.941E+00	0.371E+00	0.126	
1984	38	0	0.168E+03	0.258E+03	0.395E+01	0.773E+00	0.352E+00	0.101	
1984	39	0	0.158E+03	0.243E+03	0.312E+01	0.591E+00	0.340E+00	0.860	

Fuente. *Elaboración propia*

Una vez identificados y analizados los caudales simulados para la subcuenca de interés, estos fueron exportados en formato de texto. Posteriormente, se organizaron y trasladaron a una hoja de cálculo en Excel, junto con los caudales observados registrados por la estación hidrométrica del Km 105. Esta integración de datos en una única plataforma facilitó la comparación directa entre los caudales simulados y observados, permitiendo realizar un

análisis cuantitativo de la precisión del modelo y su capacidad para replicar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

3.6 Preparación antes de la calibración y validación.

3.6.1 Naturalización de Caudales

Para reconstruir los caudales naturales en la cuenca de estudio, afectada por la regulación hidráulica de la represa Sibinacocha ubicada aguas arriba, se implementó un proceso de naturalización hidrológica. Este procedimiento consistió en eliminar la influencia antrópica del embalse sobre el régimen de caudales mediante la siguiente relación:

$$Q_n = Q_o - Q_r$$

Donde:

Q_n = caudal naturalizado [m^3/s]

Q_o = caudal observado en estación hidrométrica del km 105 (Lucumachayoc) [m^3/s]

Q_r = caudal de descarga operativa registrado en la represa [m^3/s]

Los datos de Q_r se obtuvieron de los registros operativos de la entidad gestora de la represa (EGEMSA), validando su consistencia temporal y espacial con las series de Q_o .

El período de calibración seleccionado abarca dos tercios del tiempo total de estudio, que son los años 1984-2005, un intervalo temporal que ha sido elegido debido a la disponibilidad de datos hidrometeorológicos consistentes y representativos para la cuenca en

estudio. Este período permite capturar la variabilidad hidrológica y asegurar que el modelo esté adecuadamente ajustado a las condiciones reales.

Para la validación del modelo hidrológico, se utilizará el mismo software empleado en la fase de calibración, SWAT CUP. Este proceso de validación tiene como objetivo verificar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo condiciones diferentes a las utilizadas durante la calibración, lo cual es fundamental para asegurar la confiabilidad y precisión del modelo.

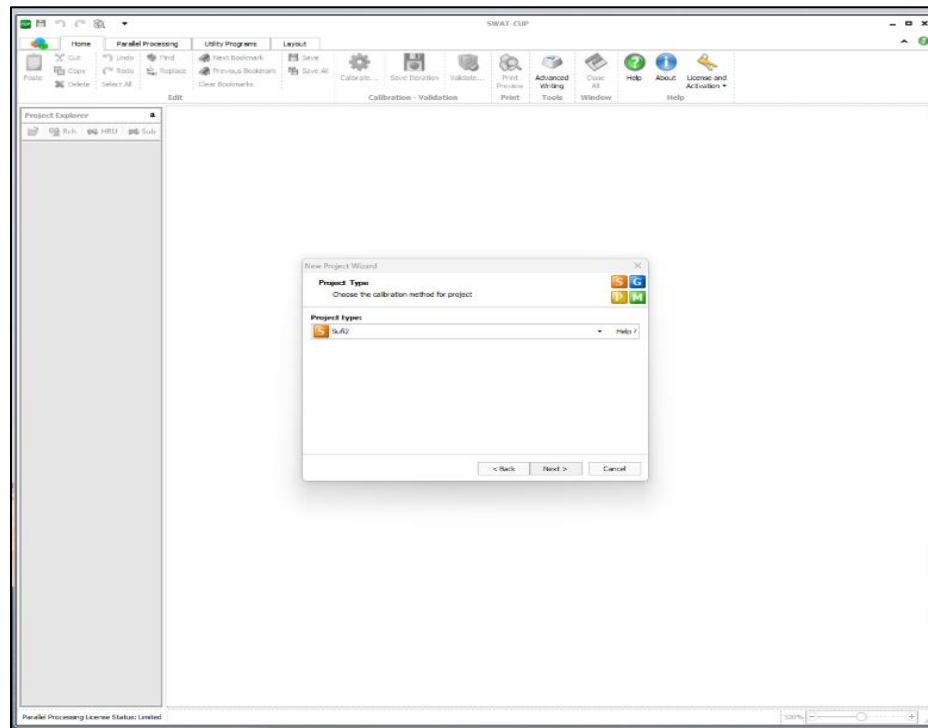
SWAT-CUP Interface

Se configuró SWAT-CUP con el algoritmo SUFI2, vinculando archivos del proyecto SWAT y definiendo parámetros a calibrar (CN, ALPHA_BF).

Se realizaron iteraciones 500 simulaciones ajustando parámetros sensibles, evaluando el desempeño con NSE y R^2 . Al finalizar, se seleccionó el mejor conjunto de parámetros.

Figura 30.

Interface de SWAT-CUP



Fuente. *Elaboración propia*

En esta etapa, se emplearán los parámetros calibrados previamente, los cuales fueron ajustados durante el proceso de calibración para minimizar las discrepancias entre los valores simulados y observados. La utilización de estos parámetros garantiza que el modelo mantenga consistencia y representatividad en su aplicación.

El período seleccionado para la validación comprende el último tercio del tiempo total de estudio, que son los últimos 11 años (2006-2016), un intervalo temporal posterior al utilizado en la calibración. Este período fue elegido para evaluar la capacidad predictiva del

modelo bajo condiciones independientes, lo cual es esencial para demostrar su robustez y aplicabilidad en escenarios futuros. Además, este enfoque permite contrastar el desempeño del modelo en un período distinto al de calibración, asegurando que no esté sobreajustado a los datos iniciales.

El procedimiento de validación sigue una metodología similar a la empleada en la calibración. Una vez cargados los datos correspondientes al período de validación, el software ejecuta el modelo utilizando los parámetros calibrados previamente. Los resultados de la simulación se comparan con los datos observados en el período 2006-2016, evaluando métricas de desempeño como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), Medida de Error Absoluto en la simulación (MSE) y el coeficiente de determinación (R^2), entre otros. Estas métricas permiten cuantificar la precisión del modelo y validar su capacidad para reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca.

3.6.2 Calibración y Validación

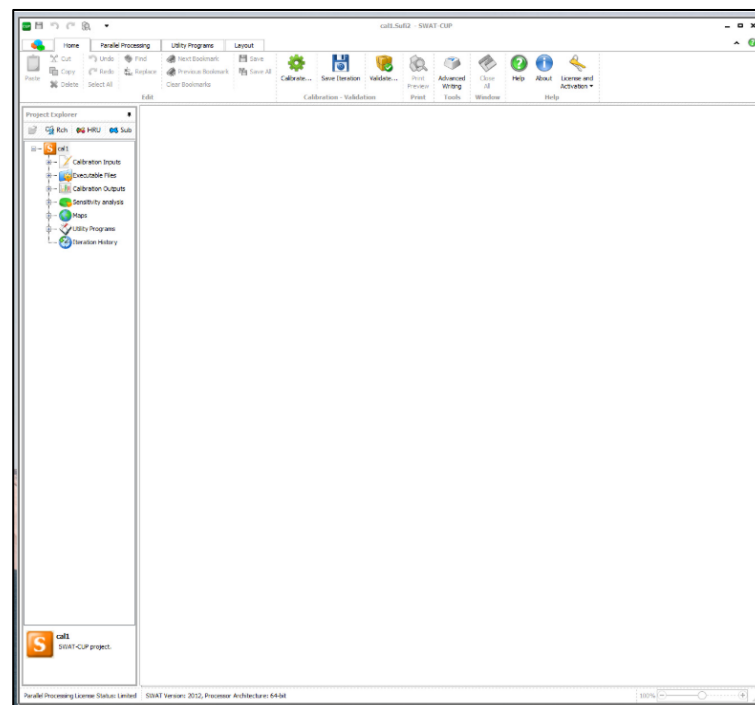
La calibración del modelo hidrológico se llevará a cabo utilizando el software SWAT CUP (Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Programs), una herramienta ampliamente reconocida en el ámbito de la hidrología para la calibración y análisis de incertidumbre de modelos. Entre los métodos disponibles en SWAT CUP, se ha seleccionado el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2) debido a su eficiencia y confiabilidad en la calibración de modelos hidrológicos complejos. Este método permite una estimación robusta de los parámetros y una cuantificación adecuada de la incertidumbre asociada a los resultados.

El proceso de calibración comienza con la carga de los datos de simulación generados previamente por el modelo SWAT. Una vez que el software ha procesado esta información, se procede a la selección de los parámetros hidrológicos que serán calibrados.

Además, es necesario especificar el número de iteraciones que el programa ejecutará para optimizar los valores de los parámetros seleccionados. Este número de iteraciones debe ser suficiente para garantizar la convergencia del modelo y la estabilidad de los resultados.

Figura 31.

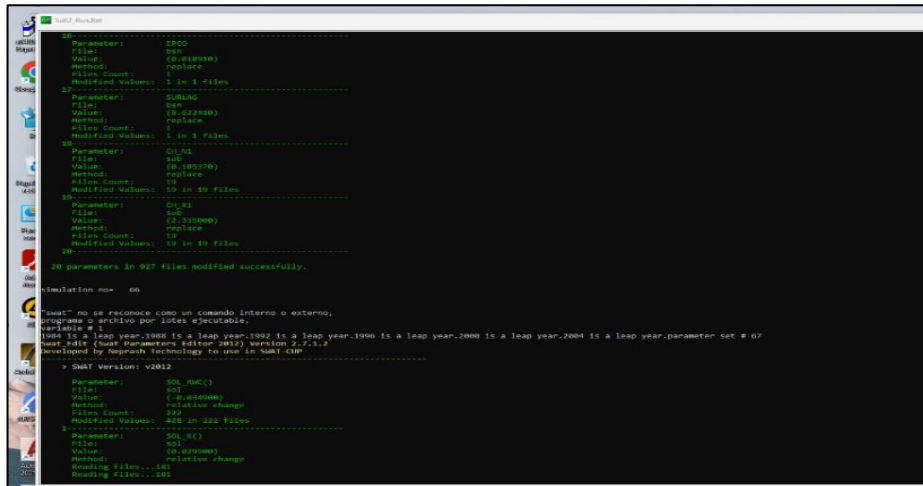
Calibración del modelo



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 32.

Inicio de simulaciones de la calibración



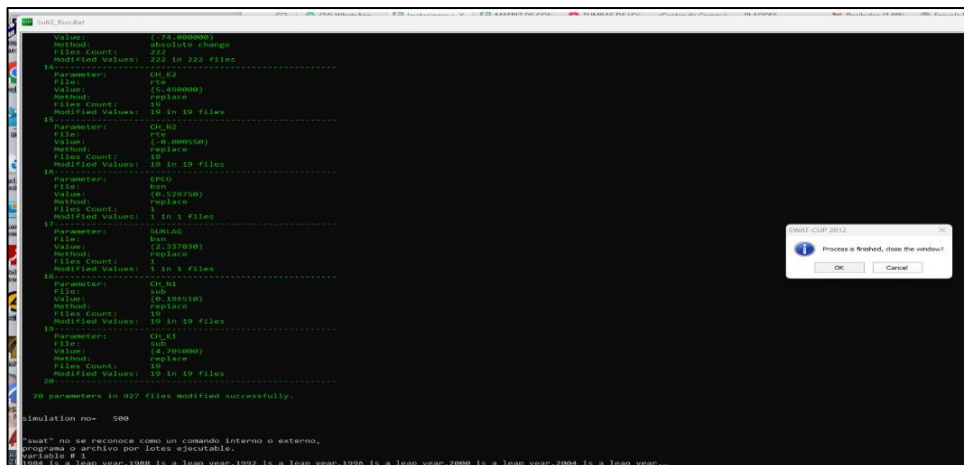
```
SPKO
Parameter: SPKO
File: SPK
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 1
Modified Values: 1 in 1 files
17
Parameter: SPK
File: SPK
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 1
Modified Values: 1 in 1 files
18
Parameter: Q1_K1
File: Q1_K1
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 19 in 19 files
19
Parameter: Q1_K1
File: Q1_K1
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 19
Modified Values: 19 in 19 files
20
20 parameters in 927 files modified successfully.
Simulation now: 66

"tut2" no se reconoce como un comando interno o externo,
programa o archivo por lotes ejecutable.
Variable # 1: year.1988 is a leap year.1992 is a leap year.1996 is a leap year.2000 is a leap year.2004 is a leap year.parameter set # 07
tut2 edit (tut2 Parameter Editor 2012) version 2.2.1.2
Developed by Approach Technology to use in Tut1.dsp
> SPAT version: v2012
Parameter: SPAT_K1
File: SPAT_K1
Value: (0.000000)
Method: relative change
Files Count: 222
Modified Values: 222 in 222 files
1
Parameter: SPAT_K1
File: SPAT_K1
Value: (0.000000)
Method: relative change
Reading Files...181
```

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 33.

Finalización de las simulaciones de la calibración



```
Value: (0.78.000000)
Method: absolute change
Files Count: 222
Modified Values: 222 in 222 files
16
Parameter: Q1_K1
File: Q1_K1
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 19
Modified Values: 19 in 19 files
17
Parameter: Q1_K1
File: Q1_K1
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 19
Modified Values: 19 in 19 files
18
Parameter: SPKO
File: SPK
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 1
Modified Values: 1 in 1 files
19
Parameter: SPK
File: SPK
Value: (0.000000)
Method: replace
Files Count: 19
Modified Values: 19 in 19 files
20
20 parameters in 927 files modified successfully.
Simulation now: 580

"tut2" no se reconoce como un comando interno o externo,
programa o archivo por lotes ejecutable.
Variable # 1: year.1988 is a leap year.1992 is a leap year.1996 is a leap year.2000 is a leap year.2004 is a leap year.
Process is finished, close the window!
OK Cancel
```

Fuente. *Elaboración propia*

En este proceso se analizó 5 posibles escenarios, 3 de ellos basados en estudios similares, que mencionaremos a continuación:

Escenario 1:

Estudio de investigación titulado "Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos con el modelo SWAT, y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados", esta investigación realizada en Quito. El estudio concluyó que el modelo SWAT tiene un buen potencial para ser usado en aplicaciones hidrológicas y podría emplearse en estudios comparativos de cambio de uso de suelo o escenarios de cambio climático. Toma en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 14.

Parámetros del escenario 1

Orden	Parámetro	Rango
1	PCP	0 - 0.2
2	SOLARAV	-0.2
3	CH_K2	0 - 25
4	MSK_CO2	0.1 - 1
5	MSK_CO1	0.1 - 1
6	MSK_X	0 - 0.3
7	GW_REVAP	0.02 - 0.2
8	GWQMN	0 - 3000
9	ALPHA_BF	0 - 1
10	GW_DELAY	0 - 500
11	SOL_AWC()	-1
12	CN2	1-ene

Fuente. Adaptación propia

Escenario 2:

Estudio de investigación titulado “Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota”, El análisis comprende una minuciosa evaluación en la identificación y comprensión de los parámetros más sensibles del modelo SWAT durante la fase de calibración (Senamhi 2015), realizado principalmente con el objetivo de ver el impacto de los parámetros en la respuesta hidrológica y en los componentes del proceso hidrológico cuyo propósito final de nuestro enfoque es calibrar el modelo SWAT de tal manera que este sea capaz de caracterizar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base. Toma en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 15.

Parámetros del escenario 2

Orden	Código del parámetro	Rango
1	v_SURLAG.hru	0.2, 0.5
2	r_SOL_BD.sol	0.2, 0.5
3	r_SOL_AWC().sol	-0.5, -0.2
4	v_GWQMN.gw	600, 700
5	v_RCHRG_DP.gw	0.3, 0.5

Fuente. Adaptación propia

Escenario 3:

Estudio de investigación titulado “Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT a la cuenca del río Cañete.”, El estudio provee una fuerte base para futuros estudios concernientes

al agua, alimentación, seguridad y administración de estrategias para el recurso del agua en las provincias de Cañete y Yauyos. Toma en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 16.

Parámetros del escenario 3

ORDEN	NOMBRE VARIABLE EN SWAT	RANGO
1	ALPHA_BF.gw	0 - 1
2	GW_DELAY.gw	0 - 500
3	GWQMN.gw	0 - 5000
4	REVAPMN.gw	0 - 500
5	ESCO.hru	0.01 - 1
6	TIMP.bsn	0 - 1
7	SMFMX.bsn	0 - 10
8	SMFMN.bsn	0 - 10
9	SMTMP.bsn	±5
10	SURLAG.bsn	24-ene
11	CH_N2.rte	0 - 0.3
12	CN2.mgt	20 - 90
13	TLAPS.sub	-40

Fuente. Adaptación propia

Los escenarios 4 y 5 fueron realizados tomando en cuenta el criterio propio al analizar estos estudios previos y respaldados por los mismos, manual del SWAT y otros estudios y artículos científicos

3.7 Metodología para determinar el grado de correlación de la precipitación - escorrentía

Para evaluar la relación entre la precipitación y la escorrentía en la cuenca de estudio, se implementó una metodología basada en la comparación de los caudales observados en la estación hidrométrica del Km 105 con los caudales simulados por el modelo SWAT. Este

proceso incluyó la calibración y validación del modelo, utilizando como referencia los caudales generados por el modelo SWAT y los registros de caudales diarios proporcionados por la estación hidrométrica.

La evaluación del desempeño del modelo se realizó mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), un indicador ampliamente utilizado en hidrología para cuantificar la precisión de las simulaciones. El NSE compara la varianza de los caudales observados con la varianza de los caudales simulados, proporcionando un valor que oscila entre $-\infty$ y 1. Un valor de 1 indica un ajuste perfecto entre los datos observados y simulados, mientras que valores superiores a 0.5 se consideran aceptables en estudios hidrológicos.

En este estudio, el coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido fue de 0.83 lo que indica un buen nivel de correlación entre los caudales observados y los caudales generados por el modelo. Este resultado sugiere que el SWAT logró replicar de manera satisfactoria el comportamiento hidrológico de la cuenca, capturando adecuadamente la relación precipitación-escorrentía. Además, este valor refleja que el modelo es capaz de representar con precisión los patrones de escorrentía, lo que valida su uso para futuros análisis y simulaciones en la cuenca del Km 105

Modelamiento Hidrológico con el software SWAT

Se procesó un modelo digital de elevación (DEM) en software GIS para delimitar automáticamente la cuenca hidrográfica, utilizando como punto de salida la estación hidrométrica del Km 105. Se obtuvo la morfología y área total de la cuenca.

Capítulo IV: Resultados

4.1. Parámetros de la cuenca de estudio

4.1.1 Generalidades.

La cuenca de estudio se localiza en el departamento de Cusco y abarca diversas provincias, incluyendo Anta, Calca, Cusco, Paucartambo, Quispicanchis, Acomayo, Canas y, en su mayor extensión, Canchis y Urubamba. Sus límites geográficos son: al norte, con las provincias de La Convención y Calca; al sur, con Espinar; al este, con Paucartambo, Quispicanchi, Carabaya y Melgar; y al oeste, con Anta, Paruro, Acomayo y Canas. Su altitud varía entre 2145 y 6323 msnm, con una elevación promedio de 3946 msnm.

El régimen climático de la cuenca se caracteriza por una precipitación media anual de 825 mm. Toda el área de estudio forma parte de la cuenca Vilcanota-Urubamba, integrada dentro de la vertiente hidrográfica del Amazonas. Además, se encuentra bajo la jurisdicción de las Autoridades Locales del Agua de Sicuani (ALA Sicuani) y Cusco (ALA Cusco).

4.1.2 Determinación de los parámetros fisiográficos.

4.1.2.1 Área (A)

La cuenca de estudio posee un área total de 9581.39 km².

Debido a que SWAT es un modelo hidrológico semi-distribuido, se requirió segmentar la cuenca en 19 subcuencas mediante el software ArcGIS. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N°17.

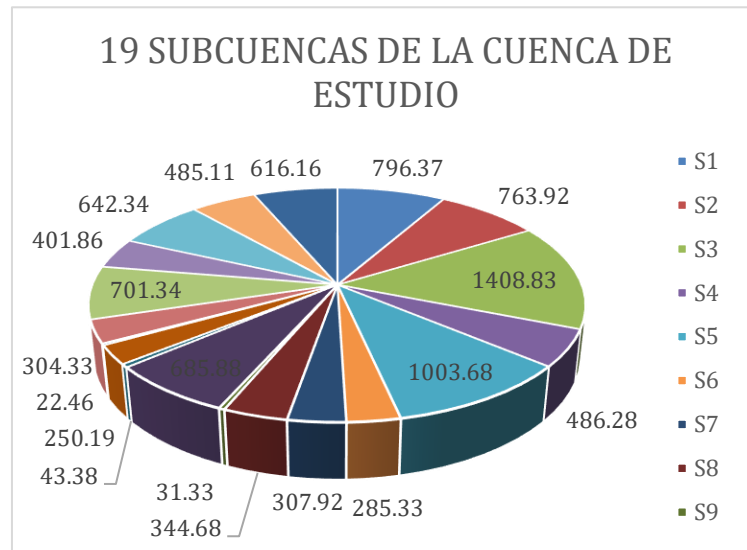
Tabla 17.*Área de las subcuencas*

Subcuenca	Área (km2)	Porcentaje (%)
S1	796.37	8.3%
S2	763.92	8.0%
S3	1408.83	14.7%
S4	486.28	5.1%
S5	1003.68	10.5%
S6	285.33	3.0%
S7	307.92	3.2%
S8	344.68	3.6%
S9	31.33	0.3%
S10	685.88	7.2%
S11	43.38	0.5%
S12	250.19	2.6%
S13	22.46	0.2%
S14	304.33	3.2%
S15	701.34	7.3%
S16	401.86	4.2%
S17	642.34	6.7%
S18	485.11	5.1%
S19	616.16	6.4%

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 34.

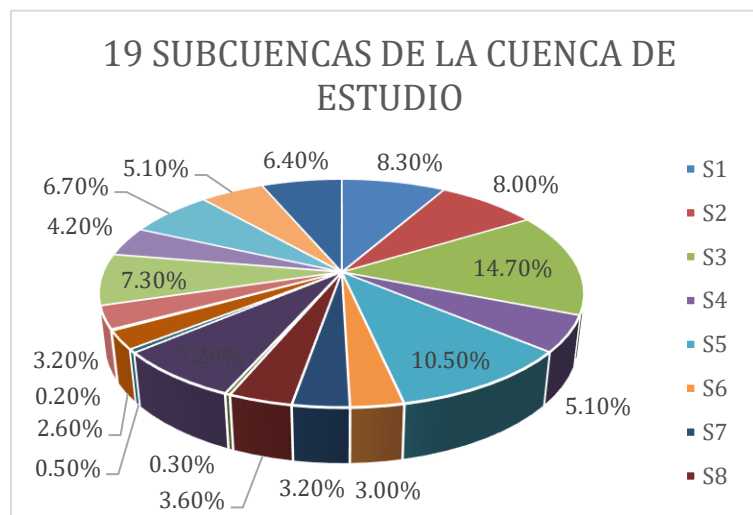
Diagrama del área en km2 de las 19 subcuencas de la cuenca de estudio



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 35.

Diagrama del área en % de las 19 subcuencas de la cuenca de estudio



Fuente. *Elaboración propia*

4.1.2.2 Perímetro (P)

El perímetro de la cuenca de estudio es de 1082.3 km.

Los perímetros de las 19 subcuencas se pueden visualizar en la tabla N°18.

Tabla 18.

Perímetro de las subcuencas

Subcuenca	Perímetro (km)
S1	223.44
S2	214.86
S3	306.78
S4	159.06
S5	253.02
S6	118.80
S7	127.50
S8	166.44
S9	34.68
S10	212.88
S11	45.60
S12	107.70
S13	30.72
S14	130.68
S15	240.84
S16	167.82
S17	172.86
S18	146.40
S19	222.42

Fuente. *Elaboración propia*

4.1.2.3. Longitud axial de la cuenca (La)

Corresponde a la máxima distancia desde el punto de desembocadura hasta el punto más lejano de la cuenca y en nuestra cuenca de estudio la longitud axial es de 227 km.

4.1.2.4. Ancho promedio (Ap)

El ancho promedio de la cuenca de estudio es de 42.2 km. (Ver anexo C.1).

4.1.2.5. Factor de forma (Ff)

El factor de forma calculado es 0.19 (ver anexo C.2), lo que indica que la cuenca posee una morfología alargada. Esta característica implica un mayor tiempo de concentración del agua, reduciendo así la probabilidad de picos de caudal elevados durante lluvias intensas. En general, Una cuenca con un factor de forma reducido tiene menor susceptibilidad a crecidas en comparación con otra de igual superficie, pero con un factor de forma más elevado. Por el contrario, un factor de forma elevado sugiere una mayor capacidad de concentrar el escurrimiento generado por precipitaciones intensas, facilitando la formación de grandes crecidas (CIDHMA, s.f.).

4.1.2.5. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelious (K)

El valor obtenido es de 3.10 (ver anexo C.3) Esto sugiere que, según la clasificación propuesta por J.J. (2004), la cuenca de estudio presenta una compacidad que varía entre una forma oval oblonga y rectangular.

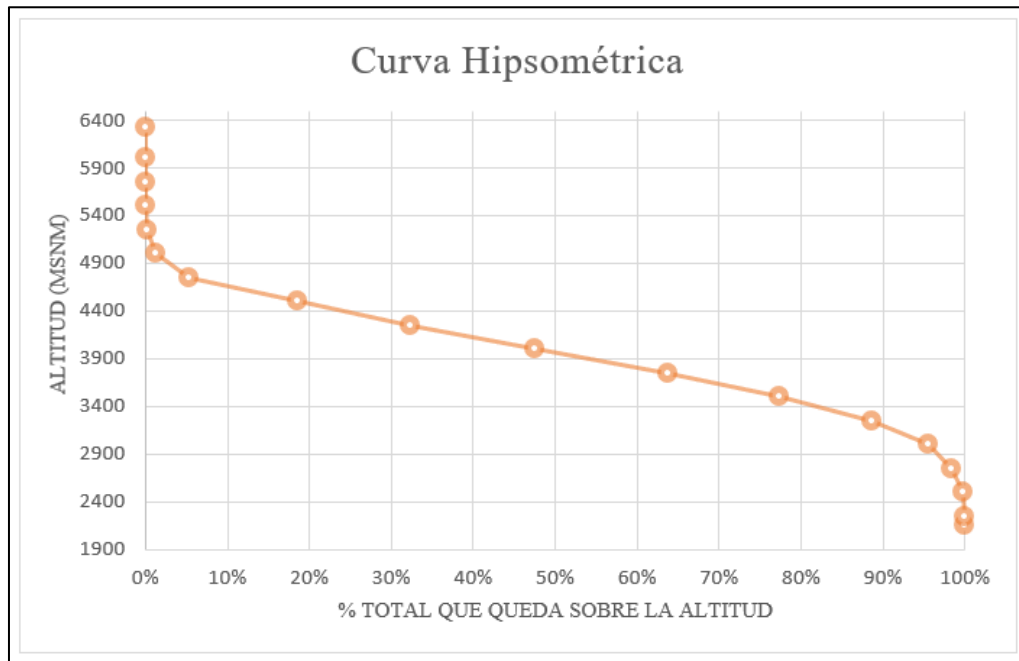
4.1.3. Determinación de los parámetros geomorfológicos.

4.1.3.1. Curva hipsométrica

Para el cálculo de la curva hipsométrica se dividió la cuenca en franjas de 250 metros, y están detallados en el Anexo C. 4.

Figura 36.

Curva hipsométrica



Fuente. *Elaboración propia*

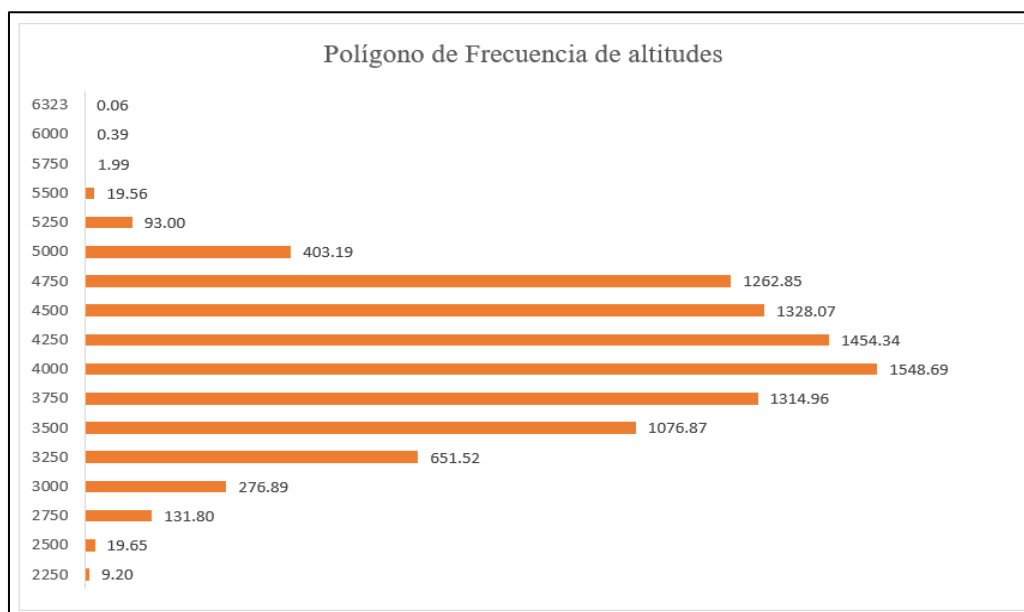
4.1.3.2. Polígono de frecuencia de altitudes

En la figura N° 56 se observa que el intervalo que contiene la mayor superficie es el que se encuentra entre las altitudes 4000 y 4250 con 1548.69 km².

Por otra parte, el intervalo entre 6000 y 6323 msnm posee la menor superficie con 0.06 km².

Figura 37.

Polígono de frecuencia de altitudes



Fuente. *Elaboración propia*

4.1.3.3. Altitud media de la cuenca (Hm)

La altitud media es de 3946.46 *msnm* (ver Anexo C.5.)

4.1.3.4. Rectángulo Equivalente

Se tiene el lado mayor de 522.8 km y un lado menor de 18.3 km.

4.1.4. Determinación de los parámetros de drenaje

4.1.4.1. Grado de ramificación

La cuenca de estudio presenta un grado de ramificación de 7 según la clasificación de Strahler. (ver Anexo C.6.)

4.1.4.2. Densidad de drenaje (Dd)

Tiene una densidad de drenaje de 0.7 (ver Anexo C.7) Esto señala que la cuenca posee un buen drenaje, lo que implica que las distancias de escurrimiento superficial son reducidas y el tiempo necesario para alcanzar los cauces de agua es breve.

4.1.4.3. Densidad de corrientes (Dc)

La densidad de corrientes de 0.6. (Ver Anexo C.8.)

4.1.4.4. Extensión media de escurrimiento (Es)

La extensión de media de escurrimiento es de 0.3 km. (Ver anexo C.9)

En la cuenca analizada, la precipitación deberá recorrer en promedio 200 metros en línea recta antes de alcanzar un curso de agua.

4.1.4.5 Resumen de los parámetros de la cuenca de estudio.

En la tabla N° 19 se encuentran los parámetros de la cuenca de estudio

Tabla 19.*Resumen de los parámetros de la cuenca*

Parámetro	Unidad	Simb	Valor
Área	km ²	A	9581.4
Perímetro	km	P	1082.3
Longitud axial	km	La	227.0
Ancho promedio	km	Ap.	42.2
Factor de forma	-	Ff	0.2
Coeficiente de compacidad	-	K	3.1
Rectángulo Lado Mayor	km	L	522.8
equivalente Lado menor	km	l	18.3
Grado de ramificación	orden	°	6
Densidad de drenaje	km/km ²	Dd	0.71
Densidad de corrientes	corr/km ²	Dc	0.57
Extensión media de escurrimiento	km	Es	0.35
Altitud media de la cuenca	msnm	Hm	3946.5
Elevación máxima de la cuenca	msnm	Hmax	6323.0
Elevación mínima de la cuenca	msnm	Hmin	2145.0

Fuente. *Elaboración propia*

4.2 Determinación de uso y tipo de suelo en la cuenca de estudio

Tras aplicar la corrección radiométrica y atmosférica a las imágenes Landsat, se llevó a cabo la clasificación supervisada mediante el software ENVI. Para ello, se consideraron las coberturas vegetales presentes en la cuenca de estudio, siguiendo el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal 2015 del MINAM y la clasificación CORINE Land Cover. Además, se analizaron las coberturas no vegetales, incluyendo áreas con escasa o nula vegetación, zonas urbanizadas, glaciares y cuerpos de agua continentales.

4.2.1. Uso y tipo de suelo en la cuenca de estudio.

Tabla 20.

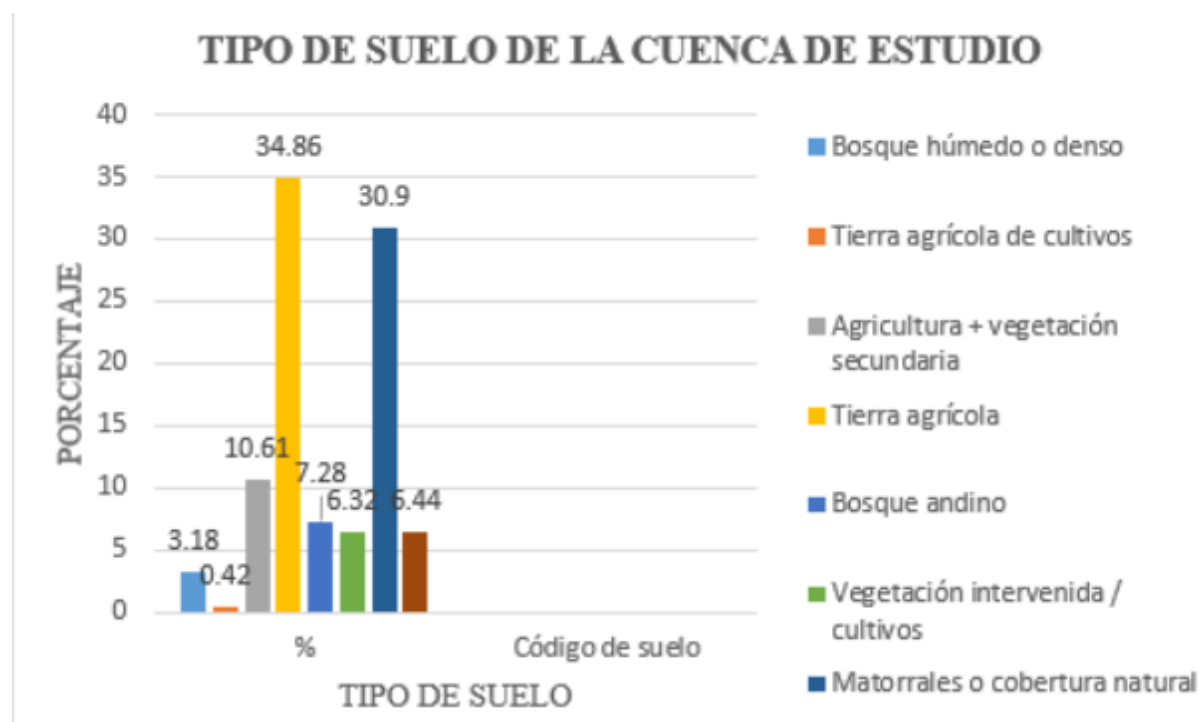
Porcentaje de tipo de suelo de la cuenca de estudio

Código SWAT	Descripción de tipo de suelo		%
HI11-3b-5497	Bosque húmedo o denso	Suelo hístico (orgánico saturado, probablemente turba)	3.18
I-Bd-c-5513	Tierra agrícola de cultivos	Inceptisol de bajo drenaje con textura arcillosa	0.42
I-Bh-Tv-c-5518	Agricultura + vegetación secundaria	Inceptisol con horizonte B húmico y textura variable	10.61
I-Bh-c-5519	Tierra agrícola	Inceptisol con horizonte B húmico de textura arcillosa	34.86
I-HI-KI-b-5527	Bosque andino	Inceptisol hístico influenciado y kándico con textura limosa	7.28
I-Kh-J-c-5531	Vegetación intervenida / cultivos	Inceptisol con horizonte kándico, joven, de textura arcillosa	6.32
KI3-3a-5572	Matorrales o cobertura natural	Litosol (suelos muy poco desarrollados sobre roca)	30.9
GLACIER-6998	Glaciar	Glaciar (hielo permanente)	6.44
			100

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 38.

Grafico del porcentaje del tipo de suelo en la cuenca de estudio



Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 21.

Porcentaje de uso de suelo de la cuenca de estudio

%	Código de uso de suelo	Descripción del uso de suelo
10	AGRL	Tierra agrícola cultivada
9.38	FRST	Bosque forestal
50.58	PAST	Pastizales
26.36	FRSD	Bosque degradado o intervenido
0.06	WETL	Humedales
2.79	WATR	Cuerpos de agua (ríos, lagunas)
0.37	URBN	Zonas urbanizadas
0.46	BARR	Áreas estériles o sin cobertura vegetal (barreales)
100		

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 39.

Grafico del porcentaje del uso de suelo en la cuenca de estudio



Fuente. *Elaboración propia*

4.3 Datos de entrada climáticas

4.3.1 Estaciones meteorológicas.

4.3.1.1 Precipitación

El producto PISCO del SENAMHI, gracias a su alta resolución espacial y su amplia serie temporal (1981-2016), permitió generar una representación continua y detallada de la precipitación en la cuenca de estudio mediante la interpolación de datos de estaciones meteorológicas. Esto contribuyó a mejorar el proceso de calibración y validación del modelo SWAT. Para este análisis, se emplearon datos de 19 estaciones meteorológicas.

Tabla 22.*Ubicación de las 19 estaciones generadas por el producto PISCO*

ID	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
1	precV1	-13.23691998	-72.35479781	4004.144235
2	precV2	-13.44297466	-72.1824792	3745.131151
3	precV3	-13.35826045	-71.93209019	3867.696422
4	precV4	-13.57614426	-71.86029743	3690.35633
5	precV5	-13.78334967	-71.55281305	4008.848689
6	precV6	-14.01313108	-71.56354371	3975.886938
7	precV7	-13.88181738	-71.06028345	4951.414963
8	precV8	-13.87291798	-70.93897753	4969.697901
9	precV9	-13.98602128	-71.46580649	3892.263587
10	precV10	-13.91736415	-71.25168494	4650.991305
11	precV11	-14.05917556	-71.45038626	3782.540519
12	precV12	-14.06526905	-71.13280349	4669.475632
13	precV13	-14.14975224	-71.1983829	4295.945068
14	precV14	-14.08258282	-71.30356799	4326.181065
15	precV15	-14.09407051	-70.96718434	4741.65136
16	precV16	-14.26421801	-71.00543399	4591.91378
17	precV17	-14.21566529	-71.35113715	3920.929453
18	precV18	-14.38188986	-71.11158105	4415.658073
19	precV19	-14.48319465	-71.17435676	4275.312769

*Fuente. Elaboración propia***Tabla 23.***Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 01, 02, 03, 04, 05*

AÑOS	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04	EST-05
1981	1.991	2.681	2.018	2.396	2.656
1982	1.717	2.290	1.679	2.000	2.031
1983	1.083	1.298	0.971	1.177	1.027
1984	1.048	1.686	1.584	2.127	2.389
1985	2.020	2.193	1.763	2.057	2.261
1986	1.377	1.800	1.346	1.665	1.560
1987	1.480	1.915	1.483	1.688	2.033
1988	1.456	1.950	1.477	1.834	2.069
1989	1.743	2.121	1.551	1.730	2.022
1990	1.795	2.170	1.577	1.797	2.084

1991	1.555	2.026	1.434	1.637	1.771
1992	1.550	1.810	1.323	1.562	1.488
1993	1.843	2.259	1.666	1.977	2.095
1994	1.787	2.376	1.711	2.111	2.028
1995	1.367	1.858	1.330	1.605	1.606
1996	1.588	2.068	1.446	1.713	2.041
1997	1.680	2.023	1.613	1.983	2.065
1998	1.156	1.331	1.084	1.356	1.563
1999	1.923	2.661	1.572	1.729	2.003
2000	1.712	2.150	1.555	1.865	1.998
2001	1.788	2.225	1.945	2.447	2.599
2002	2.190	2.802	1.946	2.218	2.578
2003	1.729	2.128	1.652	2.029	2.087
2004	1.782	2.028	1.508	1.820	2.122
2005	1.271	1.488	1.183	1.622	1.618
2006	1.669	2.153	1.687	2.200	2.312
2007	1.557	1.840	1.454	1.779	1.945
2008	1.476	1.866	1.556	1.770	1.978
2009	1.595	2.100	1.498	1.552	1.793
2010	1.750	2.417	1.698	2.154	2.004
2011	2.177	2.584	1.928	2.256	2.418
2012	1.740	2.094	1.502	1.768	2.024
2013	1.844	2.238	1.874	2.182	2.362
2014	1.536	1.764	1.398	1.782	1.926
2015	1.640	1.814	1.510	1.893	2.089
2016	1.568	1.804	1.229	1.409	1.540

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 24.

Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 06, 07, 08, 09, 10

AÑOS	EST-06	EST-07	EST-08	EST-09	EST-10
1981	3.019	2.625	2.141	2.577	2.947
1982	2.408	2.271	1.860	2.075	2.469
1983	1.098	1.545	1.304	0.967	1.510
1984	2.674	2.718	2.221	2.514	2.995
1985	2.345	2.653	2.180	2.144	2.793
1986	1.796	2.202	1.774	1.539	2.224
1987	2.244	2.287	1.987	1.986	2.432
1988	2.471	2.281	1.751	2.142	2.538
1989	2.230	2.309	1.906	1.899	2.496
1990	2.309	2.147	1.753	2.014	2.415

1991	1.965	1.843	1.514	1.654	2.018
1992	1.619	1.641	1.418	1.396	1.773
1993	2.290	2.438	2.015	2.029	2.584
1994	2.273	2.486	2.002	1.990	2.592
1995	1.858	2.045	1.640	1.603	2.129
1996	2.161	2.331	1.959	1.946	2.560
1997	2.400	2.476	1.977	2.040	2.699
1998	1.717	1.914	1.499	1.480	2.032
1999	2.230	2.308	1.885	1.996	2.517
2000	2.198	2.095	1.687	1.931	2.370
2001	2.645	2.816	2.275	2.362	3.184
2002	2.708	2.842	2.432	2.507	3.195
2003	2.110	2.360	1.861	1.863	2.535
2004	2.395	2.377	1.961	2.108	2.664
2005	1.769	1.845	1.520	1.577	2.006
2006	2.544	2.539	2.045	2.243	2.832
2007	2.236	2.204	1.774	1.953	2.434
2008	2.050	2.366	1.912	1.854	2.513
2009	2.073	2.088	1.774	1.809	2.259
2010	2.071	2.303	1.841	1.823	2.392
2011	2.338	2.593	2.149	2.169	2.823
2012	2.320	2.696	2.181	2.020	2.703
2013	2.381	3.098	2.383	2.078	3.024
2014	1.994	2.760	2.212	1.780	2.628
2015	2.205	2.839	2.254	1.939	2.778
2016	1.766	2.340	1.843	1.570	2.328

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 25.

Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15

AÑOS	EST-11	EST-12	EST-13	EST-14	EST-15
1981	2.663	3.120	2.578	2.668	2.797
1982	2.162	2.608	2.156	2.268	2.271
1983	1.013	1.617	1.185	1.180	1.504
1984	2.624	3.265	3.082	3.002	3.038
1985	2.132	3.087	2.498	2.465	2.786
1986	1.709	2.672	2.097	2.015	2.451
1987	1.980	2.538	1.993	2.083	2.267
1988	2.234	2.695	2.195	2.334	2.268
1989	1.989	2.559	2.020	2.103	2.263

1990	2.085	2.487	2.108	2.174	2.287
1991	1.708	2.103	1.724	1.734	1.852
1992	1.449	1.794	1.451	1.479	1.639
1993	2.123	2.752	2.173	2.282	2.439
1994	2.051	2.946	2.294	2.307	2.616
1995	1.771	2.369	1.914	1.932	2.071
1996	1.955	2.612	2.016	2.085	2.387
1997	2.216	2.929	2.399	2.389	2.665
1998	1.547	2.259	1.763	1.774	1.972
1999	2.065	2.657	2.078	2.169	2.295
2000	1.968	2.471	1.979	2.067	2.208
2001	2.382	3.158	2.538	2.644	2.663
2002	2.456	3.247	2.698	2.726	2.921
2003	1.900	2.762	2.159	2.164	2.387
2004	2.071	2.744	2.165	2.228	2.400
2005	1.635	2.191	1.803	1.804	2.036
2006	2.290	2.968	2.378	2.500	2.539
2007	2.043	2.515	1.977	2.115	2.139
2008	1.898	2.679	2.093	2.119	2.287
2009	1.855	2.411	1.930	1.966	2.171
2010	1.892	2.685	2.073	2.083	2.303
2011	2.168	3.044	2.435	2.467	2.710
2012	2.132	3.178	2.414	2.435	2.771
2013	2.098	3.280	2.339	2.371	2.811
2014	1.785	2.955	2.090	2.078	2.674
2015	2.026	3.019	2.145	2.251	2.682
2016	1.711	2.662	2.098	2.089	2.380

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 26.

Precipitaciones medias anuales del año 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19

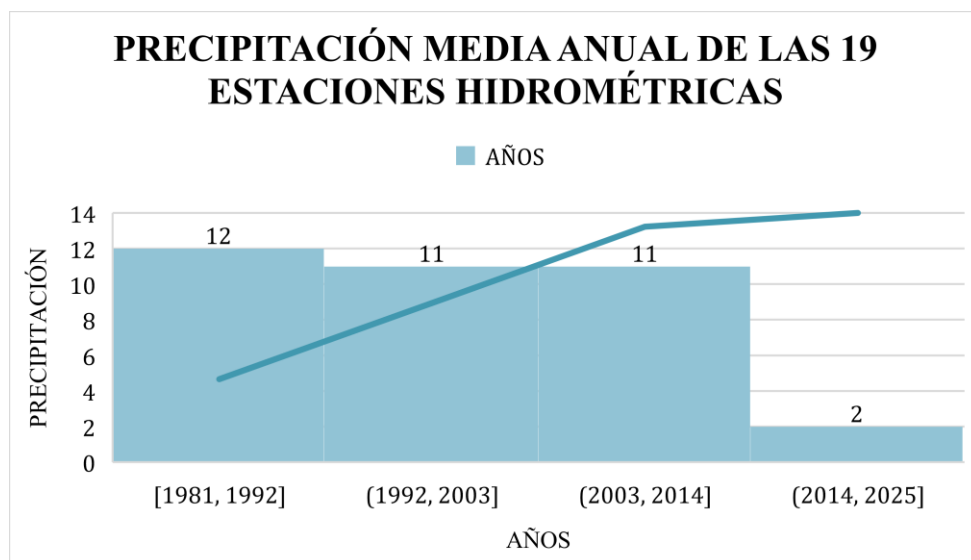
AÑOS	EST-16	EST-17	EST-18	EST-19
1981	2.639	2.695	2.804	2.613
1982	2.133	2.277	2.332	2.258
1983	1.281	1.115	1.266	1.192
1984	3.215	3.258	3.591	3.356
1985	2.697	2.365	2.757	2.544
1986	2.395	2.024	2.433	2.293
1987	2.016	1.906	2.034	1.813
1988	2.082	2.216	2.137	2.037

1989	2.016	2.053	2.078	1.941
1990	2.224	2.207	2.409	2.228
1991	1.714	1.746	1.831	1.712
1992	1.499	1.472	1.547	1.417
1993	2.282	2.245	2.323	2.212
1994	2.457	2.189	2.512	2.338
1995	1.930	1.965	2.040	1.898
1996	2.245	1.951	2.246	2.065
1997	2.558	2.458	2.746	2.607
1998	1.844	1.737	1.963	1.864
1999	2.187	2.101	2.233	2.087
2000	2.056	1.992	2.148	2.083
2001	2.340	2.479	2.490	2.294
2002	2.757	2.628	2.859	2.644
2003	2.172	2.043	2.207	2.045
2004	2.230	2.075	2.298	2.096
2005	1.959	1.790	2.056	1.950
2006	2.409	2.367	2.526	2.318
2007	1.982	2.047	2.061	2.013
2008	2.074	2.019	2.156	1.975
2009	2.022	1.906	2.078	1.885
2010	2.108	1.976	2.208	2.031
2011	2.526	2.320	2.548	2.390
2012	2.526	2.309	2.544	2.348
2013	2.436	2.192	2.470	2.185
2014	2.311	1.895	2.245	1.960
2015	2.310	2.128	2.221	2.022
2016	2.252	2.014	2.265	1.951

Fuente. *Elaboración propia*

Figura 40.

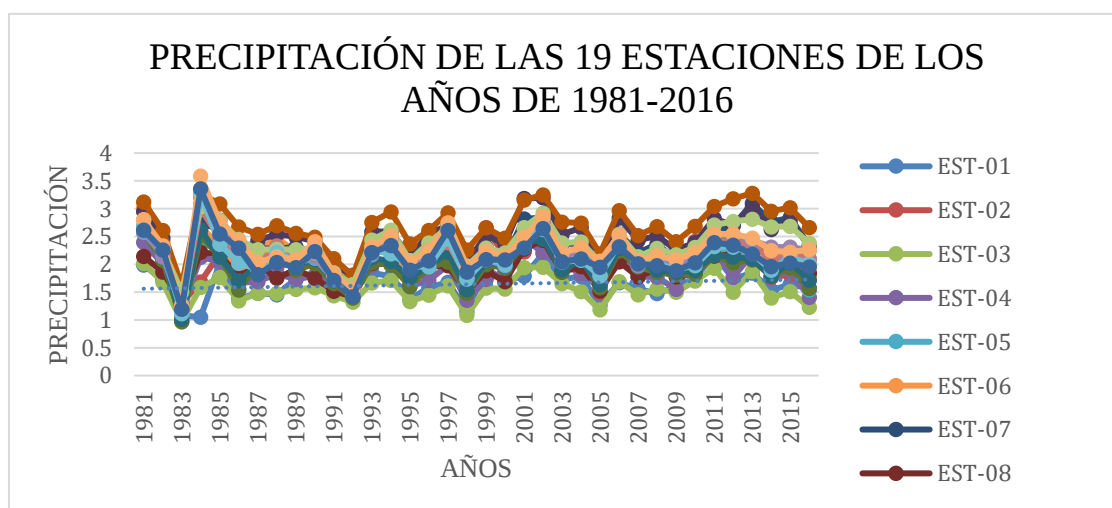
Histograma de precipitación media anual de las 19 estaciones del año 1981-2016



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 41.

Diagrama de precipitación media anual las 19 estaciones de los años de 1981-2016



Fuente. *Elaboración propia*

4.3.1.2 Temperatura

Asimismo, los datos de temperatura fueron recopilados de las 19 estaciones previamente mencionadas, las cuales se detallan en el siguiente cuadro.

Tabla 27.

Temperatura máxima y mínima por el producto PISCO

ID	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
1	tempV1	-13.23691998	-72.35479781	4004.144235
2	tempV2	-13.44297466	-72.1824792	3745.131151
3	tempV3	-13.35826045	-71.93209019	3867.696422
4	tempV4	-13.57614426	-71.86029743	3690.35633
5	tempV5	-13.78334967	-71.55281305	4008.848689
6	tempV6	-14.01313108	-71.56354371	3975.886938
7	tempV7	-13.88181738	-71.06028345	4951.414963
8	tempV8	-13.87291798	-70.93897753	4969.697901
9	tempV9	-13.98602128	-71.46580649	3892.263587
10	tempV10	-13.91736415	-71.25168494	4650.991305
11	tempV11	-14.05917556	-71.45038626	3782.540519
12	tempV12	-14.06526905	-71.13280349	4669.475632
13	tempV13	-14.14975224	-71.1983829	4295.945068
14	tempV14	-14.08258282	-71.30356799	4326.181065
15	tempV15	-14.09407051	-70.96718434	4741.65136
16	tempV16	-14.26421801	-71.00543399	4591.91378
17	tempV17	-14.21566529	-71.35113715	3920.929453
18	tempV18	-14.38188986	-71.11158105	4415.658073
19	tempV19	-14.48319465	-71.17435676	4275.312769

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 28.*Temperatura máxima anual de los años 1981-2016 de las estaciones 01, 02, 03, 04, 05*

AÑOS	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04	EST-05
1981	18.981	20.236	20.037	20.671	18.968
1982	19.214	20.581	20.288	20.967	19.156
1983	20.108	21.649	21.300	22.029	20.227
1984	18.629	20.071	19.779	20.423	18.645
1985	19.006	20.328	20.052	20.651	18.873
1986	18.999	20.394	20.112	20.822	18.932
1987	20.064	21.434	21.159	21.788	20.023
1988	19.683	21.110	20.885	21.516	19.802
1989	18.897	20.347	20.068	20.692	18.939
1990	19.378	20.647	20.418	20.985	19.270
1991	19.602	20.855	20.616	21.169	19.453
1992	19.476	20.754	20.499	21.076	19.329
1993	18.995	20.385	20.129	20.800	19.057
1994	19.529	20.783	20.543	21.163	19.372
1995	20.035	21.458	21.172	21.772	20.055
1996	19.305	20.692	20.401	20.940	19.262
1997	19.355	20.708	20.466	21.078	19.348
1998	20.513	21.915	21.658	22.188	20.571
1999	19.112	20.445	20.219	20.782	19.087
2000	19.103	20.611	20.325	20.912	19.186
2001	19.273	20.551	20.293	20.831	19.102
2002	19.308	20.489	20.258	20.805	19.052
2003	19.874	21.074	20.847	21.358	19.677
2004	19.559	20.667	20.485	21.065	19.352
2005	20.264	21.461	21.238	21.769	20.083
2006	19.897	20.971	20.812	21.309	19.673
2007	19.863	21.111	20.875	21.405	19.756
2008	19.687	21.170	20.833	21.430	19.737
2009	20.044	21.347	21.111	21.723	20.035
2010	20.584	22.057	21.749	22.294	20.638
2011	19.706	21.312	20.981	21.568	19.849
2012	19.858	21.306	21.023	21.647	19.866
2013	20.086	21.442	21.173	21.721	20.013
2014	20.411	21.668	21.438	21.909	20.278
2015	20.439	21.631	21.391	21.896	20.218
2016	21.061	22.249	21.992	22.503	20.821

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 29.*Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 06, 07, 08, 09, 10*

AÑOS	EST-06	EST-07	EST-08	EST-09	EST-10
1981	17.172	14.856	14.805	17.023	15.590
1982	17.399	14.934	14.878	17.295	15.618
1983	18.457	16.076	15.986	18.428	16.719
1984	16.843	14.466	14.350	16.703	15.162
1985	17.082	14.689	14.637	16.892	15.461
1986	17.027	14.604	14.664	17.044	15.361
1987	18.235	15.955	15.965	18.113	16.699
1988	18.034	15.774	15.665	17.854	16.490
1989	17.085	14.747	14.815	17.042	15.548
1990	17.453	15.187	15.219	17.291	15.964
1991	17.643	15.412	15.464	17.495	16.207
1992	17.499	15.189	15.273	17.379	16.012
1993	17.207	14.861	14.854	17.208	15.572
1994	17.572	15.203	15.257	17.447	15.991
1995	18.293	15.967	15.870	18.124	16.692
1996	17.555	15.271	15.254	17.319	16.083
1997	17.531	15.234	15.130	17.342	15.974
1998	18.883	16.706	16.644	18.667	17.480
1999	17.305	15.016	15.033	17.153	15.798
2000	17.343	15.067	15.098	17.330	15.835
2001	17.227	14.929	15.146	17.239	15.788
2002	17.131	14.856	15.146	17.189	15.700
2003	17.827	15.599	15.842	17.839	16.460
2004	17.490	15.278	15.516	17.528	16.101
2005	18.307	16.092	16.172	18.193	16.872
2006	17.838	15.623	15.786	17.727	16.456
2007	17.993	15.802	15.879	17.859	16.591
2008	18.001	15.737	15.705	17.865	16.478
2009	18.310	16.063	16.064	18.142	16.843
2010	18.845	16.688	16.732	18.846	17.446
2011	17.965	15.687	15.704	18.018	16.450
2012	17.980	15.651	15.719	18.004	16.425
2013	18.252	15.977	16.005	18.106	16.774
2014	18.524	16.273	16.324	18.360	17.133
2015	18.407	16.106	16.225	18.318	16.934
2016	19.083	16.811	16.888	18.943	17.626

Fuente. *Elaboración propia*

Tabla 30.*Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15*

AÑOS	EST-11	EST-12	EST-13	EST-14	EST-15
1981	17.045	15.607	17.253	16.703	15.318
1982	17.317	15.494	17.384	16.787	15.289
1983	18.552	16.586	18.464	17.867	16.404
1984	16.748	15.115	16.869	16.286	14.872
1985	16.906	15.448	17.085	16.541	15.145
1986	17.090	15.390	17.063	16.535	15.087
1987	18.180	16.695	18.255	17.736	16.409
1988	17.873	16.470	18.070	17.518	16.199
1989	17.158	15.627	17.112	16.627	15.273
1990	17.352	16.013	17.503	16.996	15.689
1991	17.566	16.293	17.689	17.208	15.942
1992	17.493	16.093	17.512	17.046	15.722
1993	17.269	15.591	17.326	16.750	15.339
1994	17.496	15.989	17.574	17.057	15.672
1995	18.200	16.616	18.282	17.737	16.343
1996	17.448	16.068	17.504	17.002	15.733
1997	17.374	15.989	17.612	17.047	15.701
1998	18.741	17.484	18.876	18.384	17.165
1999	17.207	15.832	17.320	16.816	15.505
2000	17.438	15.881	17.369	16.871	15.556
2001	17.406	15.887	17.251	16.801	15.496
2002	17.325	15.804	17.226	16.750	15.446
2003	17.968	16.568	17.876	17.441	16.174
2004	17.649	16.208	17.593	17.128	15.849
2005	18.236	16.893	18.345	17.854	16.571
2006	17.822	16.571	17.931	17.463	16.187
2007	17.948	16.660	18.052	17.564	16.324
2008	17.998	16.500	18.017	17.500	16.202
2009	18.184	16.917	18.342	17.855	16.577
2010	18.999	17.490	18.881	18.405	17.171
2011	18.188	16.471	18.022	17.495	16.171
2012	18.133	16.463	18.012	17.501	16.139
2013	18.215	16.763	18.220	17.722	16.435
2014	18.450	17.177	18.499	18.045	16.789
2015	18.396	16.998	18.442	17.960	16.639
2016	18.983	17.655	19.068	18.604	17.307

Fuente. *Elaboración propia*

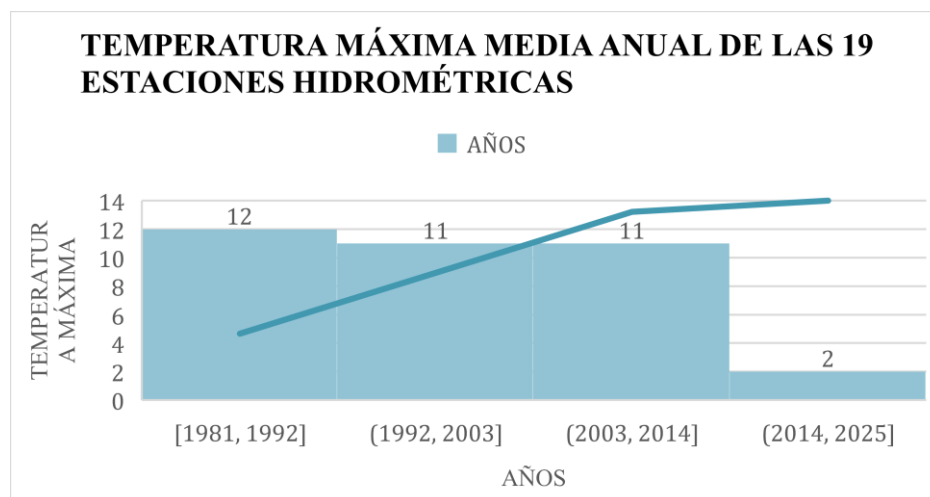
Tabla 31.*Temperatura máxima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19*

AÑOS	EST-16	EST-17	EST-18	EST-19
1981	16.043	17.894	16.782	16.682
1982	16.104	18.110	16.890	16.843
1983	17.218	19.299	17.994	18.005
1984	15.613	17.561	16.347	16.265
1985	15.873	17.739	16.625	16.484
1986	15.874	17.828	16.650	16.524
1987	17.105	18.959	17.839	17.701
1988	16.880	18.692	17.583	17.474
1989	16.007	17.890	16.765	16.630
1990	16.367	18.177	17.100	16.923
1991	16.606	18.363	17.329	17.131
1992	16.418	18.285	17.176	17.019
1993	16.151	18.053	16.926	16.843
1994	16.420	18.293	17.192	17.055
1995	17.063	19.011	17.802	17.739
1996	16.405	18.272	17.148	17.011
1997	16.406	18.252	17.145	17.005
1998	17.798	19.542	18.503	18.363
1999	16.196	17.997	16.928	16.765
2000	16.278	18.121	17.015	16.859
2001	16.233	18.095	17.014	16.818
2002	16.209	18.020	17.013	16.784
2003	16.894	18.674	17.668	17.454
2004	16.598	18.382	17.376	17.194
2005	17.259	19.006	17.992	17.817
2006	16.882	18.623	17.635	17.437
2007	17.004	18.733	17.730	17.554
2008	16.911	18.763	17.634	17.534
2009	17.264	18.991	17.989	17.832
2010	17.857	19.676	18.571	18.443
2011	16.919	18.839	17.677	17.576
2012	16.900	18.819	17.668	17.524
2013	17.124	18.971	17.871	17.711
2014	17.453	19.218	18.203	18.005
2015	17.361	19.152	18.127	17.942
2016	17.993	19.746	18.737	18.562

Fuente. Elaboración propia

Figura 42.

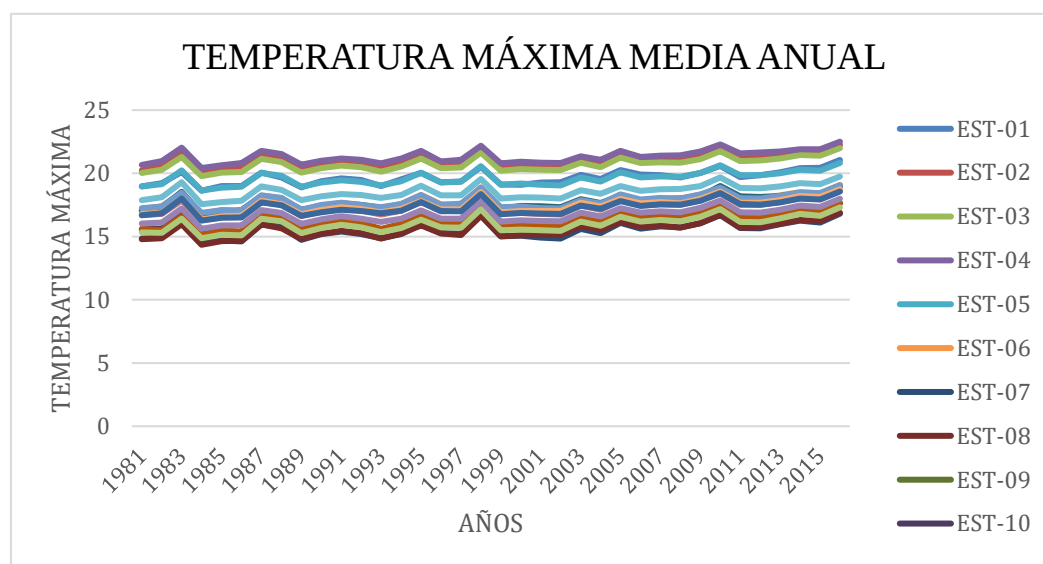
Temperatura máxima media anual de las 19 estaciones hidrométricas



Fuente. *Elaboración propia*

Figura 43.

Temperatura máxima media anual de las 19 estaciones hidrométricas.



Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 32.*Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 1, 2, 3, 4, 5.*

AÑOS	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04	EST-05
1981	3.14	3.95	3.97	4.42	2.94
1982	3.02	3.81	3.83	4.33	2.84
1983	3.20	4.13	4.10	4.66	3.10
1984	3.12	4.00	3.99	4.48	3.05
1985	2.75	3.59	3.57	4.02	2.61
1986	2.75	3.70	3.67	4.18	2.70
1987	3.11	3.94	3.93	4.44	2.92
1988	3.28	3.99	4.00	4.41	2.96
1989	2.79	3.77	3.71	4.25	2.73
1990	3.10	3.91	3.89	4.38	2.86
1991	2.87	3.65	3.66	4.13	2.61
1992	2.67	3.47	3.47	3.96	2.41
1993	3.05	3.90	3.89	4.38	2.94
1994	2.98	3.87	3.87	4.38	2.92
1995	3.19	3.77	3.83	4.11	2.64
1996	3.45	4.21	4.27	4.66	3.26
1997	3.09	3.98	4.01	4.58	3.07
1998	3.69	4.54	4.52	5.04	3.56
1999	3.15	3.91	3.92	4.38	2.97
2000	3.15	4.09	4.06	4.59	3.12
2001	3.38	4.20	4.19	4.70	3.28
2002	3.96	4.72	4.73	5.15	3.79
2003	3.38	4.17	4.19	4.67	3.20
2004	3.37	4.16	4.15	4.59	3.15
2005	3.25	4.12	4.13	4.60	3.11
2006	3.39	4.19	4.19	4.62	3.18
2007	3.60	4.37	4.37	4.75	3.38
2008	2.87	3.74	3.75	4.26	2.75
2009	3.47	4.22	4.25	4.67	3.20
2010	3.71	4.48	4.49	4.94	3.47
2011	3.38	4.21	4.21	4.70	3.25
2012	3.29	4.04	4.04	4.49	3.05
2013	3.64	4.41	4.39	4.79	3.36
2014	3.77	4.54	4.56	5.01	3.59
2015	3.78	4.48	4.53	4.96	3.50
2016	3.43	4.22	4.21	4.71	3.21

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 33.*Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 6, 7, 8, 9, 10.*

AÑOS	EST-06	EST-07	EST-08	EST-09	EST-10
1981	3.04	-3.20	-3.85	2.31	-2.26
1982	2.92	-3.47	-4.12	2.28	-2.54
1983	3.17	-3.45	-4.18	2.50	-2.52
1984	3.07	-2.97	-3.54	2.54	-2.07
1985	2.60	-3.41	-3.88	2.11	-2.49
1986	2.80	-3.46	-4.15	2.15	-2.56
1987	3.01	-3.41	-4.07	2.33	-2.49
1988	2.97	-3.12	-3.64	2.39	-2.19
1989	2.81	-3.39	-4.09	2.22	-2.58
1990	2.89	-3.34	-3.97	2.27	-2.43
1991	2.68	-3.75	-4.40	2.00	-2.80
1992	2.42	-4.09	-4.70	1.78	-3.13
1993	3.00	-3.27	-3.89	2.40	-2.35
1994	2.97	-3.26	-3.87	2.41	-2.36
1995	2.53	-3.66	-4.04	2.03	-2.55
1996	3.27	-2.73	-3.30	2.67	-1.81
1997	3.16	-3.39	-4.09	2.54	-2.49
1998	3.67	-2.71	-3.45	2.94	-1.80
1999	3.02	-3.04	-3.58	2.43	-2.11
2000	3.14	-3.02	-3.62	2.62	-2.16
2001	3.27	-2.77	-3.29	2.82	-1.93
2002	3.75	-2.12	-2.63	3.29	-1.26
2003	3.21	-3.02	-3.58	2.69	-2.11
2004	3.12	-2.94	-3.43	2.62	-2.02
2005	3.16	-3.13	-3.79	2.52	-2.21
2006	3.21	-3.04	-3.60	2.64	-2.10
2007	3.35	-2.59	-3.10	2.83	-1.68
2008	2.81	-3.61	-4.33	2.18	-2.70
2009	3.24	-3.03	-3.65	2.63	-2.07
2010	3.53	-2.70	-3.28	2.87	-1.72
2011	3.28	-2.88	-3.47	2.72	-1.97
2012	3.11	-3.27	-3.75	2.50	-2.24
2013	3.34	-2.75	-3.17	2.83	-1.77
2014	3.61	-2.52	-3.11	3.05	-1.62
2015	3.51	-2.84	-3.31	2.94	-1.81
2016	3.25	-3.16	-3.76	2.67	-2.21

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 34.*Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 11, 12, 13, 14, 15.*

AÑOS	EST-11	EST-12	EST-13	EST-14	EST-15
1981	3.08	-2.65	-0.58	-0.32	-2.70
1982	3.10	-2.94	-0.72	-0.48	-2.96
1983	3.31	-2.89	-0.58	-0.35	-2.92
1984	3.38	-2.43	-0.37	-0.13	-2.45
1985	3.00	-2.81	-0.82	-0.57	-2.86
1986	2.94	-2.99	-0.80	-0.58	-2.99
1987	3.12	-2.90	-0.66	-0.43	-2.90
1988	3.18	-2.55	-0.52	-0.26	-2.60
1989	3.00	-3.09	-0.73	-0.57	-3.01
1990	3.05	-2.86	-0.68	-0.44	-2.89
1991	2.80	-3.21	-1.00	-0.74	-3.26
1992	2.60	-3.48	-1.29	-1.03	-3.55
1993	3.26	-2.72	-0.56	-0.32	-2.74
1994	3.24	-2.74	-0.57	-0.33	-2.74
1995	2.95	-2.81	-1.06	-0.69	-3.02
1996	3.45	-2.16	-0.20	0.07	-2.22
1997	3.44	-2.89	-0.55	-0.32	-2.86
1998	3.70	-2.18	0.04	0.27	-2.21
1999	3.26	-2.43	-0.42	-0.16	-2.49
2000	3.44	-2.54	-0.36	-0.13	-2.54
2001	3.66	-2.28	-0.12	0.11	-2.29
2002	4.15	-1.59	0.43	0.67	-1.62
2003	3.51	-2.47	-0.32	-0.07	-2.48
2004	3.49	-2.34	-0.32	-0.06	-2.40
2005	3.34	-2.62	-0.47	-0.22	-2.64
2006	3.51	-2.48	-0.37	-0.11	-2.51
2007	3.68	-1.99	-0.04	0.22	-2.06
2008	2.97	-3.09	-0.85	-0.60	-3.11
2009	3.44	-2.41	-0.35	-0.07	-2.48
2010	3.66	-2.05	-0.05	0.24	-2.14
2011	3.55	-2.31	-0.22	0.03	-2.35
2012	3.42	-2.53	-0.51	-0.20	-2.63
2013	3.73	-2.06	-0.13	0.16	-2.17
2014	3.87	-1.94	0.13	0.38	-1.99
2015	3.84	-2.11	-0.11	0.21	-2.21
2016	3.50	-2.57	-0.36	-0.12	-2.61

Fuente. *Elaboración propia.*

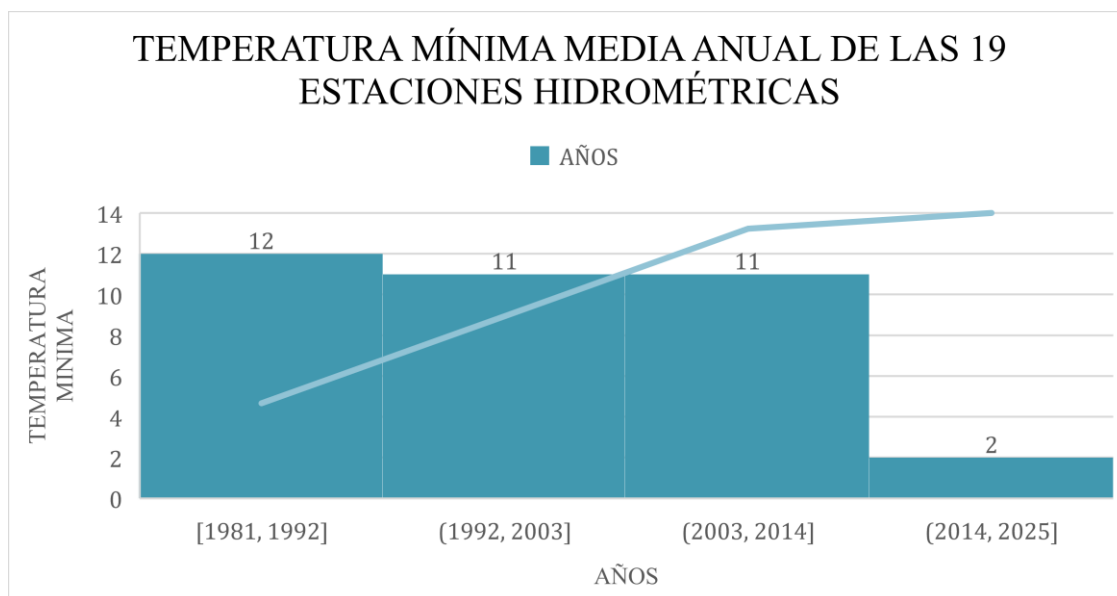
Tabla 35.*Temperatura mínima anual de los años de 1981-2016 de las estaciones 16, 17, 18, 19.*

AÑOS	EST-16	EST-17	EST-18	EST-19
1981	-1.86	1.58	-0.72	-0.91
1982	-2.02	1.55	-0.82	-0.96
1983	-1.94	1.75	-0.72	-0.85
1984	-1.57	1.89	-0.43	-0.56
1985	-1.95	1.50	-0.80	-0.93
1986	-2.09	1.42	-0.93	-1.05
1987	-1.97	1.58	-0.78	-0.94
1988	-1.73	1.67	-0.59	-0.76
1989	-2.05	1.50	-0.90	-0.96
1990	-1.98	1.54	-0.82	-0.93
1991	-2.33	1.25	-1.14	-1.27
1992	-2.60	1.04	-1.39	-1.56
1993	-1.82	1.76	-0.64	-0.76
1994	-1.81	1.69	-0.64	-0.77
1995	-2.13	1.38	-0.92	-1.17
1996	-1.39	1.94	-0.27	-0.46
1997	-1.88	1.83	-0.64	-0.76
1998	-1.29	2.21	-0.13	-0.25
1999	-1.60	1.80	-0.46	-0.60
2000	-1.60	1.92	-0.45	-0.56
2001	-1.34	2.15	-0.19	-0.28
2002	-0.73	2.70	0.39	0.27
2003	-1.56	1.95	-0.39	-0.54
2004	-1.49	1.98	-0.35	-0.49
2005	-1.76	1.79	-0.60	-0.75
2006	-1.59	1.95	-0.40	-0.54
2007	-1.19	2.21	-0.07	-0.22
2008	-2.19	1.39	-1.01	-1.14
2009	-1.59	1.88	-0.41	-0.60
2010	-1.27	2.18	-0.12	-0.29
2011	-1.45	2.05	-0.30	-0.42
2012	-1.70	1.87	-0.47	-0.63
2013	-1.26	2.21	-0.09	-0.25
2014	-1.08	2.34	0.07	-0.07
2015	-1.30	2.29	-0.08	-0.27
2016	-1.63	1.95	-0.42	-0.54

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 44.

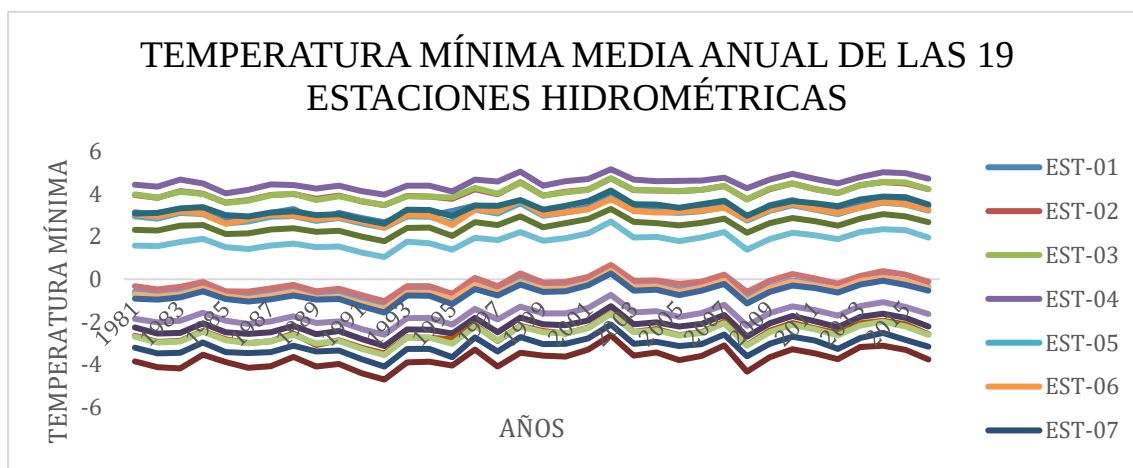
Histograma de la temperatura mínima media anual de las 19 estaciones hidrométricas



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 45.

Diagrama de temperatura mínima media anual de las 19 estaciones hidrométricas



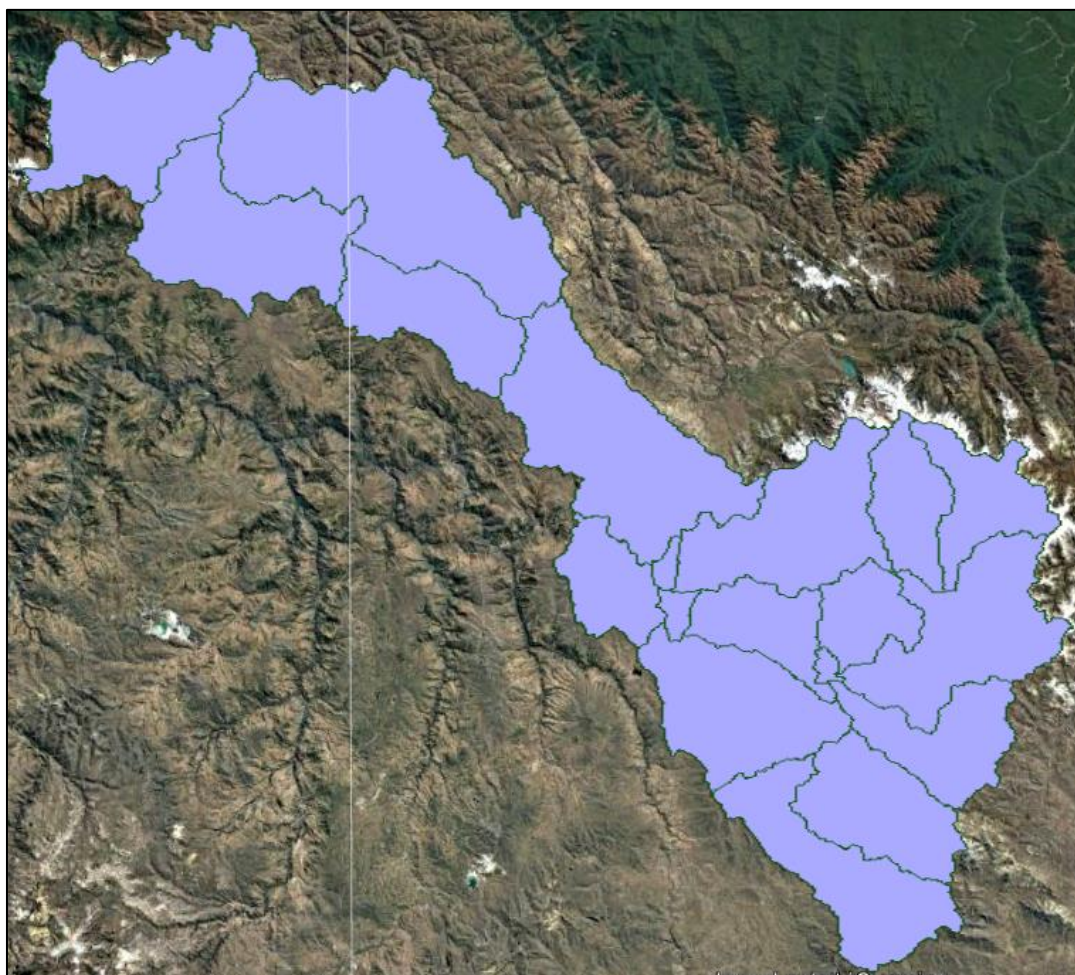
Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.2 Modelo esquemático.

La Figura 63 muestra el modelo esquemático de la cuenca de estudio generado en ArcSWAT, donde se representa su delimitación y subdivisión en 19 subcuencas.

Figura 46.

Modelo esquemático de la cuenca de estudio



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.3 Calibración y validación del modelo.

Se realizó el proceso de calibración y validación del modelo utilizando diversos parámetros basados en referencias nacionales e internacionales, también se llevó a cabo siguiendo las directrices del manual de SWAT-CUP.

4.3.3.1 Escenario 1

Según Pérez (2020), en su estudio sobre la evaluación de caudales líquidos y producción de sedimentos con SWAT, se determinaron parámetros de calibración y validación con indicadores estadísticos satisfactorios.

Para nuestra investigación, empleamos los mismos parámetros, que son los siguientes:

Tabla 36.

Parámetros utilizados en el escenario 1

Con esta referencia en nuestro modelo calibramos y validamos con los mismos parámetros, teniendo el siguiente resultado:

Parámetro	Unidad	Método de Reemplazo	Valor Inicial	Rango	Valor Óptimo
PCP	mm	Multiplicar al valor inicial	Depende de Subcuenca	0 - 0.2	1.17
SOLARAV	MJ·m ² ·día	Multiplicar al valor inicial	Depende de Subcuenca	-0.2	-0.06
CH_K2	mm·hr ⁻¹	Añadir al valor inicial	0	0 - 25	8.83
MSK_CO2	-	Reemplazar con nuevo valor	0.25	0.1 - 1	7.05
MSK_CO1	-	Reemplazar con nuevo valor	0.75	0.1 - 1	7.05

MSK_X	-	Reemplazar con nuevo valor	0.2	0 - 0.3	0.18
GW_REVAP	-	Reemplazar con nuevo valor	0.02	0.02 - 0.2	0.2
GWQMN	mm	Reemplazar con nuevo valor	1000	0 - 3000	1
ALPHA_BF	días	Reemplazar con nuevo valor	0.048	0 - 1	0.54
GW_DELAY	días	Reemplazar con nuevo valor	31	0 - 500	25
SOL_AWC()	mm·mm ⁻¹ suelo	Multiplicar al valor inicial	En función del tipo de suelo	-1	-0.5
CN2	-	Multiplicar al valor inicial		1-ene	1.73

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 37.

Indicadores estadísticos en la calibración ante el escenario 1

R2	NS	PBIAS	KGE
0.72	0.50	38.4	0.43

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 38.

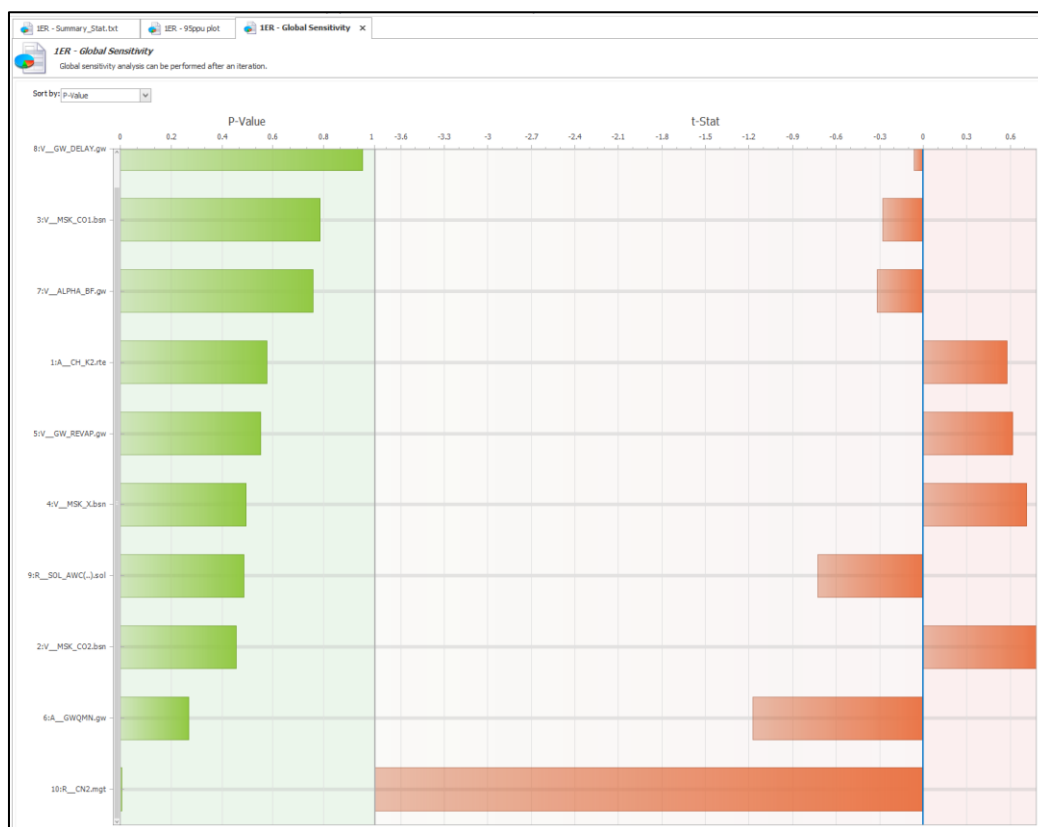
Indicadores estadísticos en la validación ante el escenario 1.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.78	0.67	29.2	0.60

Fuente. *Elaboración propia.*

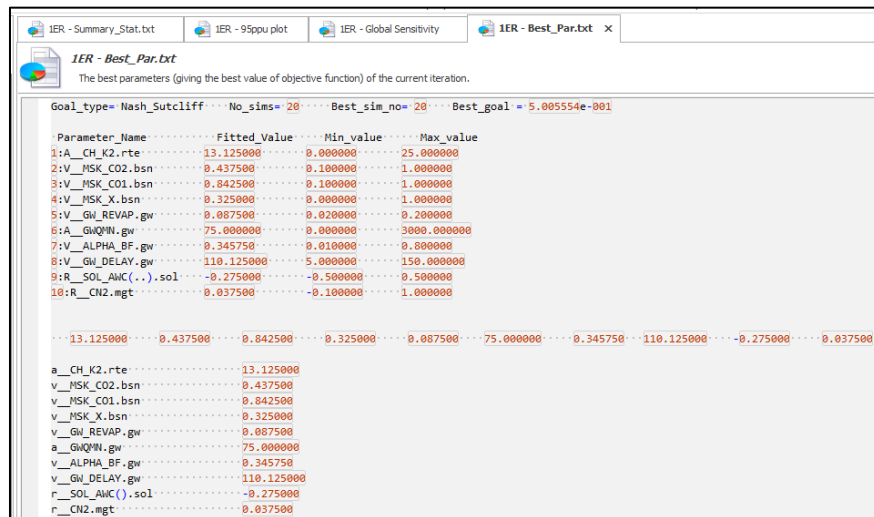
Figura 47.

Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 1.



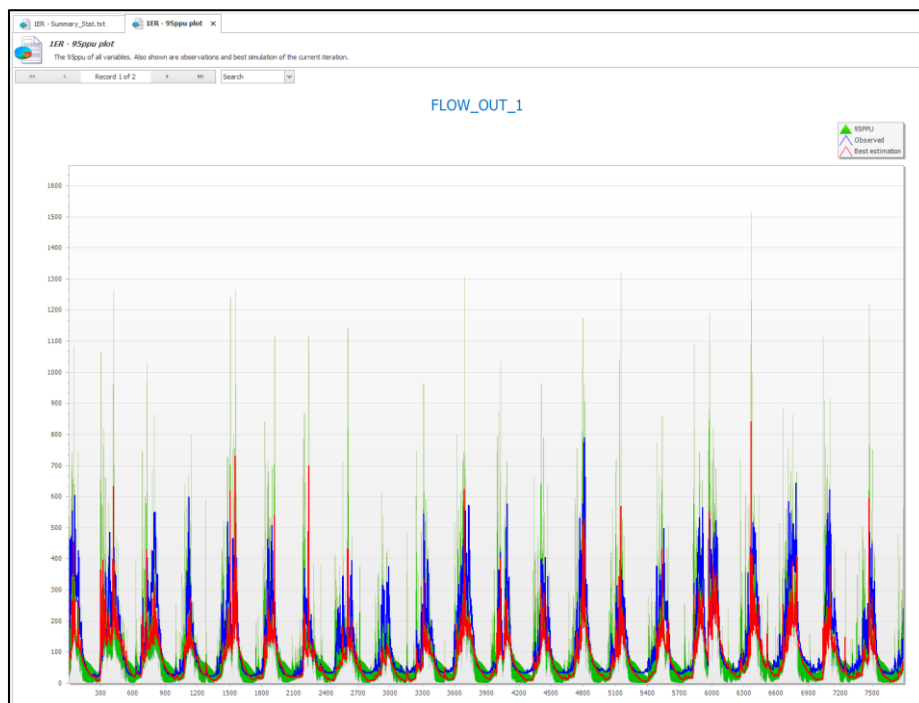
Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 48.
Mejores resultados de los parámetros ante el escenario 1.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 49.
Correlación de caudales ante el escenario 1.



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.3.2 Escenario 2

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2016), en su análisis de incertidumbre y evaluación del desempeño del modelo SWAT, se obtuvo un NSE de 0.73 en calibración y 0.79 en validación, indicadores óptimos del modelo.

Con esta referencia en nuestro modelo calibramos y validamos con los mismos parámetros, teniendo el siguiente resultado:

Tabla 39.

Parámetros utilizados por el informe del SENAMHI

Orden	Código del parámetro	Rango	Valor ajustado
1	v_SURLAG.hru	0.2, 0.5	0.2
2	r_SOL_BD.sol	0.2, 0.5	0.34
3	r_SOL_AWC().sol	-0.5, -0.2	-0.33
4	v_GWQMN.gw	600, 700	681.3
5	v_RCHRG_DP.gw	0.3, 0.5	0.36

Fuente. *Elaboración propia.*

Con esta referencia en nuestro modelo calibramos y validamos con los mismos parámetros, teniendo el siguiente resultado:

Tabla 40.

Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 2.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.83	0.79	13.1	0.81

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 41.

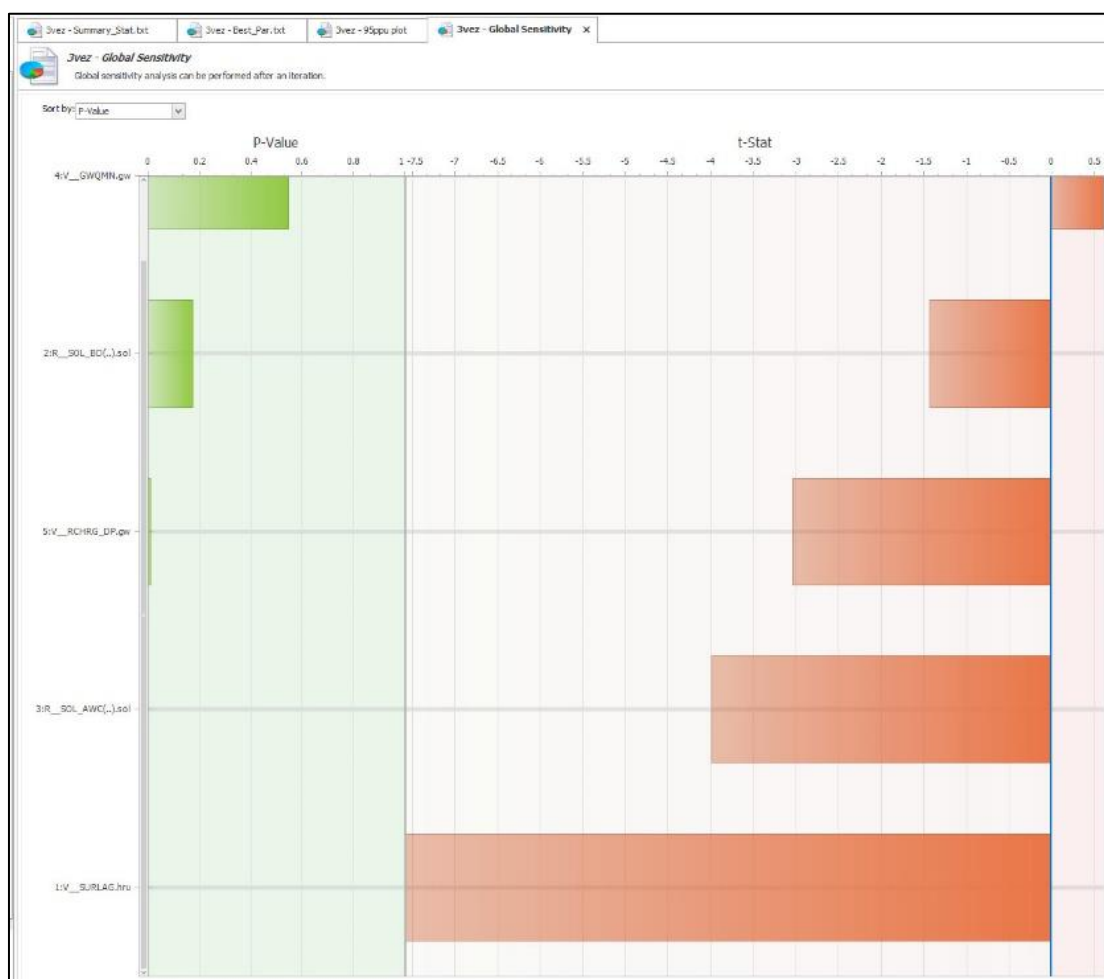
Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 2.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.81	0.78	13.7	0.83

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 50.

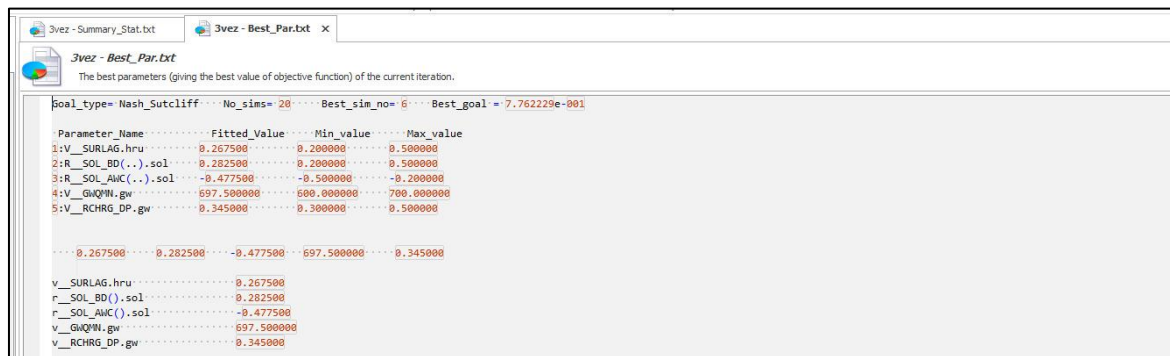
Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 2.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 51.

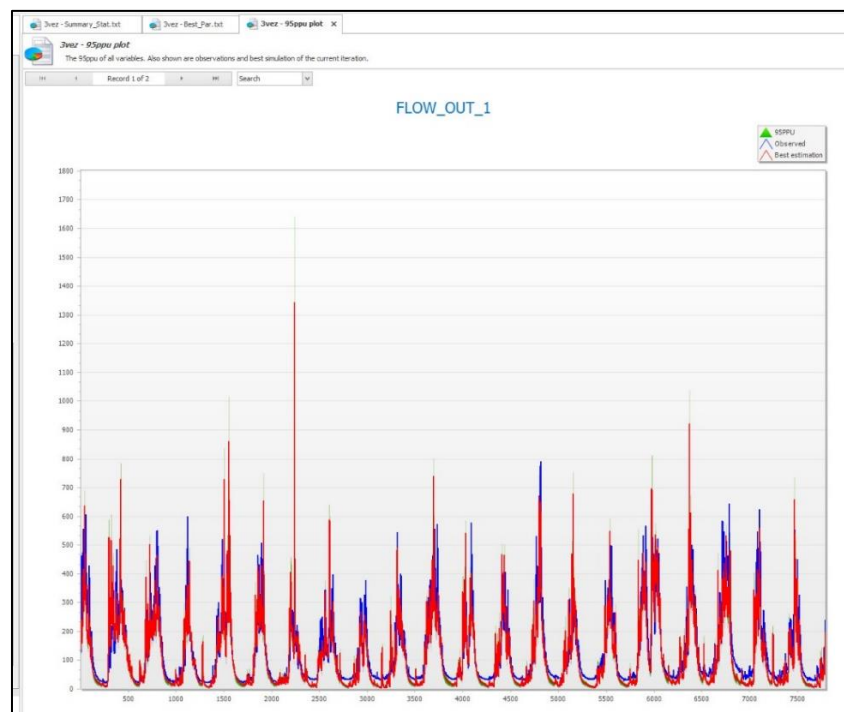
Mejores resultados ante el escenario 2.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 52.

Correlación de caudales ante el escenario 2.



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.3.3 Escenario 3

Según el estudio *Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT a la Cuenca del Río Cañete*, en su proceso de calibración y validación se consideraron los siguientes parámetros.

Tabla 42.

Parámetros utilizados en el escenario 3.

PARÁMETRO	NOMBRE VARIABLE EN SWAT	RANGO	VALOR DEFAULT	VALOR OBTENIDO CALIBRACIÓN MANUAL
Baseflow alpha factor [days]	ALPHA_BF .gw	0 - 1	0.048	0.01
Groundwater delay [days]	GW_DELA Y.gw	0 - 500	31	25
Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	GWQMN.g w	0 - 5000	0	1
Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap"	REVAPMN .gw	0 - 500	1	50
Soil evaporation compensation factor	ESCO.hru	0.01 - 1	0.95	1
Snow pack temperature lag factor	TIMP.bsn	0 - 1	0.5	0.5
Melt factor for snow on June 21 [mm H ₂ O/°C·day]	SMFMX.bs n	0 - 10	4.5	3.5
Melt factor for snow on December 21 [mm H ₂ O/°C·day]	SMFMN.bs n	0 - 10	4.5	1
Snow melt base temperature [°C]	SMTMP.bs n	±5	0	2
Surface runoff lag time [days]	SURLAG.b sn	24-ene	4	8
Manning's n value for main channel	CH_N2.rte	0 - 0.3	Varia por HRU	Varia por HRU
Initial SCS CN II value	CN2.mgt	20 - 90	Varia por HRU	Varia por HRU
Temperature lapse rate [°C/km]	TLAPS.sub	-40	0	-6.5

Fuente. *Elaboración propia.*

Estos parámetros se utilizaron en nuestro análisis y los resultados obtenidos se detallan a continuación.

Tabla 43.

Resultados de los indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 3.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.79	0.46	43.4	0.36

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 44.

Resultados de los indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 3.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.54	0.10	56.8	0.13

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 53.

Mejores resultados de los parámetros ante el escenario 3.

```

Goal_type= Nash_Sutcliffe No_sies= 20 Best_sie_no= 11 Best_goal = 4.646147e-001

Parameter_Name Fitted Value Min_value Max_value
1)V_ALPHA_BF 0.775000 0.000000 1.000000
2)V_OU_DELAY 87.500000 0.000000 500.000000
4)V_GROWTH 3375.000000 0.000000 5000.000000
4)A_REVAPEM 87.500000 0.000000 500.000000
5)V_ESC 0.975250 0.010000 1.000000
6)V_TIMP 0.804250 0.010000 1.000000
7)V_SHPK 3.250000 0.000000 10.000000
8)V_SHPM 3.250000 0.000000 10.000000
9)V_SHTP -3.750000 -5.000000 5.000000
10)V_SURLAG 14.224999 1.000000 24.000000
11)V_CR2_rte 0.837500 0.000000 0.300000
12)V_CR2_mgt 81.250000 20.000000 90.000000
13)V_TLAPS_sub -5.000000 -20.000000 20.000000

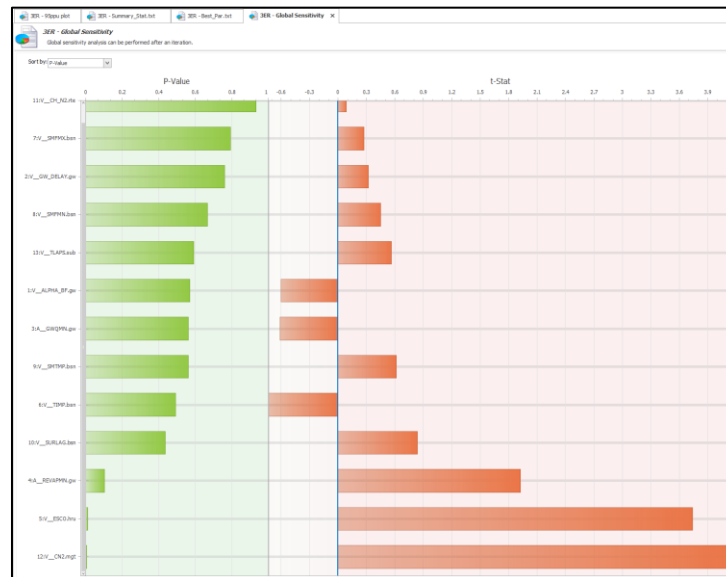
0.775000 87.500000 3375.000000 87.500000 0.975250 0.804250 3.250000 3.250000 -3.750000 14.224999 0.837500 81.250000 -5.000000

V_ALPHA_BF 0.775000
V_OU_DELAY 87.500000
V_GROWTH 3375.000000
A_REVAPEM 87.500000
V_ESC 0.975250
V_TIMP 0.804250
V_SHPK 3.250000
V_SHPM 3.250000
V_SHTP -3.750000
V_SURLAG 14.224999
V_CR2_rte 0.837500
V_CR2_mgt 81.250000
V_TLAPS_sub -5.000000

```

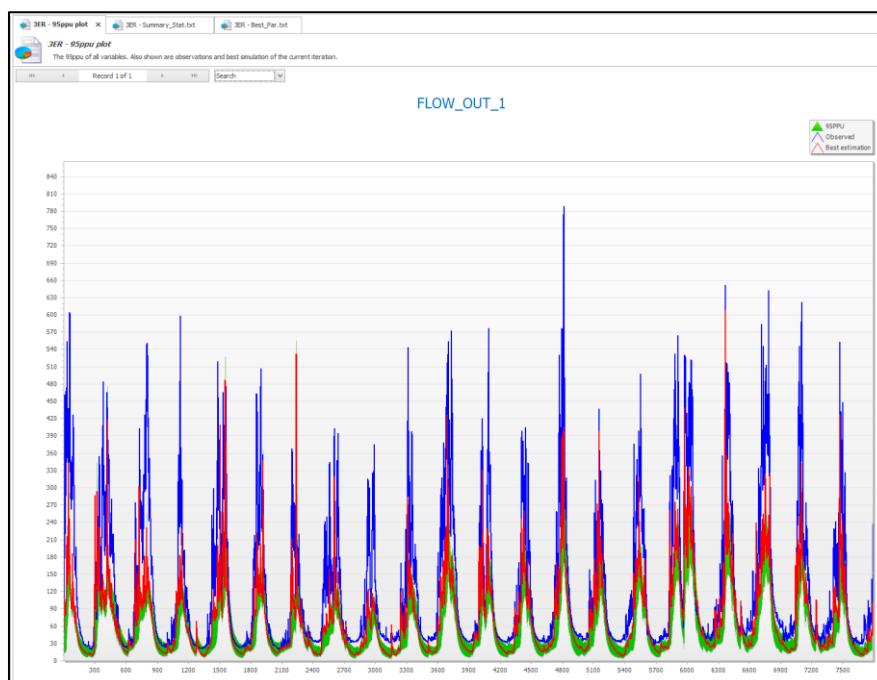
Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 54.
Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 3.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 55.
Correlación de los caudales ante el escenario 3.



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.3.4 Escenario 4

Basándonos en nuestro análisis de la relación precipitación-escorrentía, se parametrizaron diversos factores, incluyendo la escorrentía y el flujo base, de acuerdo con los manuales de SWAT-CUP. Los parámetros utilizados son los que se detallan en la tabla N°45.

Tabla 45.

Parámetros utilizados en el escenario 4.

Parámetro	Rango recomendado	Impacto en el modelo	Relación con
r_CN2.mgt	-0.1 a 0.1	Controla la escorrentía superficial; valores altos aumentan la escorrentía y reducen la infiltración.	Escorrentía
a_GWQMN.gw	-1000 a 1000	Ajusta el nivel mínimo del acuífero para que haya flujo base; valores bajos aseguran un flujo constante.	Flujo base
v_REVAPMN.gw	100 a 600 mm	Define el nivel mínimo de agua en el acuífero para permitir evapotranspiración.	Flujo base
a_GW_DELAY.gw	-30 a 150 días	Controla el retardo del agua subterránea antes de contribuir al flujo base.	Flujo base
v_ALPHA_BF.gw	0 a 1	Determina la tasa de recarga del flujo base desde el acuífero.	Flujo base
v_GW_REVAP.gw	0.02 a 0.2	Controla la tasa de evapotranspiración del acuífero somero. Valores altos reducen el flujo base.	Flujo base
v_GW_SPYLD.gw	0.001 a 0.4	Define el rendimiento específico del acuífero, afectando la cantidad de flujo base.	Flujo base
v_LAT_TTIME.hru	0 a 180 días	Controla el tiempo de tránsito del flujo lateral en el suelo. Valores altos retrasan la llegada del agua al cauce.	Flujo base
r_SOL_AWC().sol	-0.05 a 0.05	Controla la capacidad de retención de agua en el suelo; afecta la infiltración y la escorrentía.	Escorrentía / Flujo base
v_SURLAG.bsn	0.01 a 24	Controla la velocidad con la que la escorrentía superficial llega al cauce.	Escorrentía
r_SOL_BD().sol	0.2 a 0.5	Influye en la compactación del suelo, afectando la infiltración y la escorrentía.	Escorrentía
r_RCHRG_DP.gw	0.3 a 0.5	Determina la cantidad de agua que se recarga al agua subterránea.	Flujo base

r_ESCO.bsn	0.1 a 0.5	Controla la fracción de escorrentía generada por la lluvia.	Escorrentía
v_CH_N2.rte	-0.01 a 0.2	Define la rugosidad de Manning en los canales principales, influyendo en la velocidad del flujo.	Escorrentía
r_OV_N.hru	-0.5 a 0.5	Controla la velocidad de la escorrentía en HRUs, afectando los caudales pico.	Escorrentía

Fuente. *Elaboración propia.*

Tenemos los siguientes resultados:

Tabla 46.

Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 4.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.79	0.71	26.5	0.64

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 47.

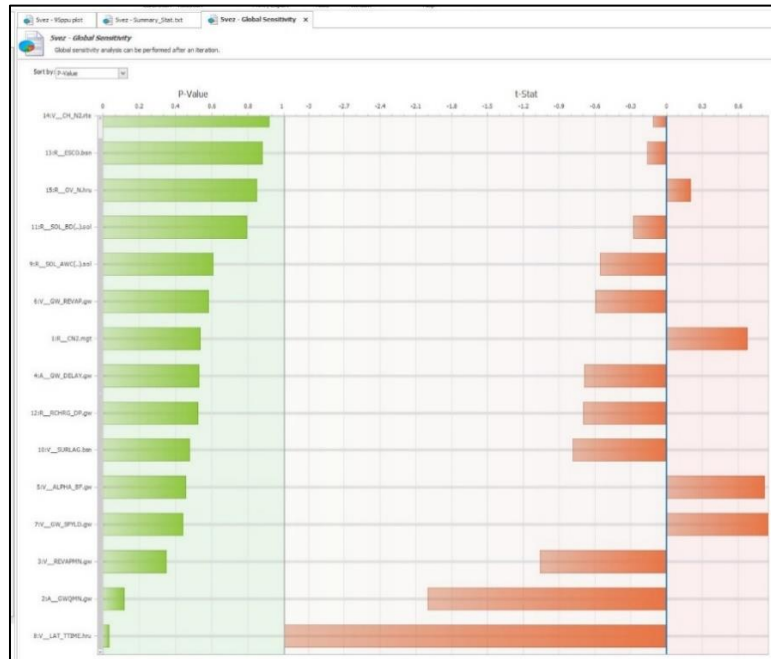
Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 4.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.82	0.77	23.00	0.74

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 56.

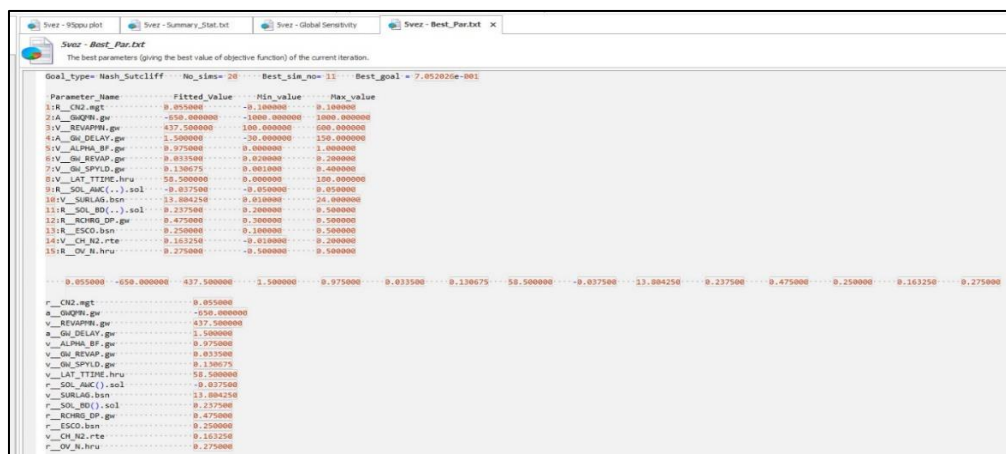
Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 4.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 57,

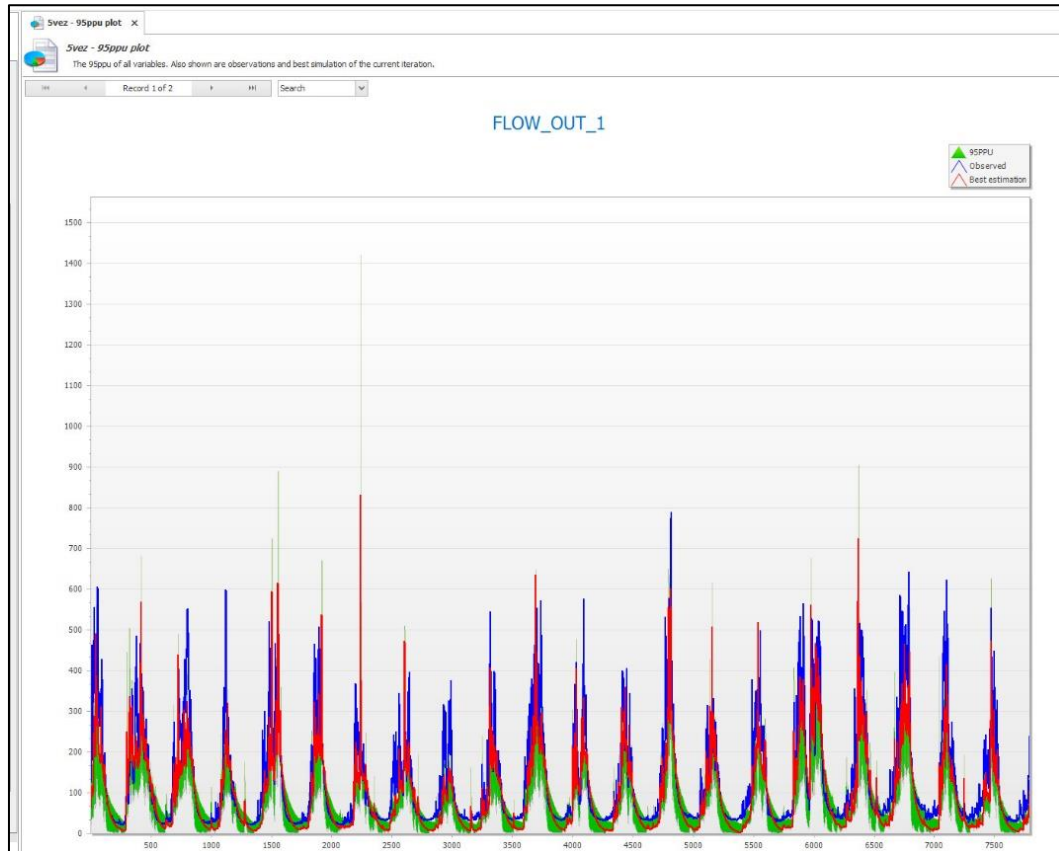
Mejores resultados ante el escenario 4.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 58.

Correlación de los caudales ante el escenario 4.



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.3.5 Escenario 5

Al analizar los resultados, es importante considerar también los gráficos obtenidos en los escenarios anteriores. Por ello, se realizó un análisis utilizando distintos parámetros y destacando la importancia del flujo base. Los parámetros empleados se detallan en la Tabla N°48.

Tabla 48.
Parámetros utilizados en el escenario 5.

Parámetro	Rango recomendado	Impacto en el modelo	Relación (Escorrentía, Flujo Base, Precipitación)
r__CN2.mgt	-0.05 a 0.2	Afecta la generación de escorrentía superficial (mayor CN2 = más escorrentía)	Escorrentía
a__GWQMN.gw	80 a 400	Define la cantidad mínima de agua subterránea para generar flujo base	Flujo Base
v__REVAPMN.gw	50 a 100	Controla la evaporación del agua subterránea hacia el suelo	Flujo Base
a__GW_DELAY.gw	60 a 450	Tiempo de retardo del flujo base desde el acuífero al arroyo	Flujo Base
v__ALPHA_BF.gw	0.3 a 0.7	Factor de respuesta del flujo base (mayor valor = respuesta más rápida)	Flujo Base
v__GW_REVAP.gw	0.02 a 0.2	Controla la tasa de evaporación desde el acuífero al suelo	Flujo Base
v__GW_SPYLD.gw	0.02 a 0.15	Rendimiento específico del acuífero (afecta el almacenamiento de agua subterránea)	Flujo Base
v__LAT_TTIME.hru	30 a 120	Tiempo de traslado del flujo lateral al cauce	Escorrentía (lateral)
r__SOL_AWC().sol	0.07 a 0.25	Capacidad de retención de agua en el suelo (más AWC = menos escorrentía)	Escorrentía, Flujo Base
v__SURLAG.bs	4 a 8	Tiempo de retraso de la escorrentía superficial al cauce	Escorrentía
r__SOL_BD().sol	1.1 a 1.6	Densidad aparente del suelo (afecta infiltración y almacenamiento)	Escorrentía, Flujo Base
r__RCHRG_DP.gw	0.2 a 0.6	Porcentaje de agua que percola del suelo a la zona saturada	Flujo Base
r__ESCO.bsn	0.6 a 0.9	Coefficiente de disponibilidad de agua para evaporación del suelo	Precipitación (evapotranspiración)
v__CH_N2.rte	0.03 a 0.05	Rugosidad de los cauces secundarios (afecta velocidad y escorrentía)	Escorrentía
r__OV_N.hru	0.1 a 0.5	Rugosidad de la superficie del terreno para flujo superficial	Escorrentía

Fuente. *Elaboración propia.*

Tenemos los siguientes resultados:

Tabla 49.

Indicadores estadísticos de la calibración ante el escenario 5.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.78	0.71	22.1	0.65

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 50.

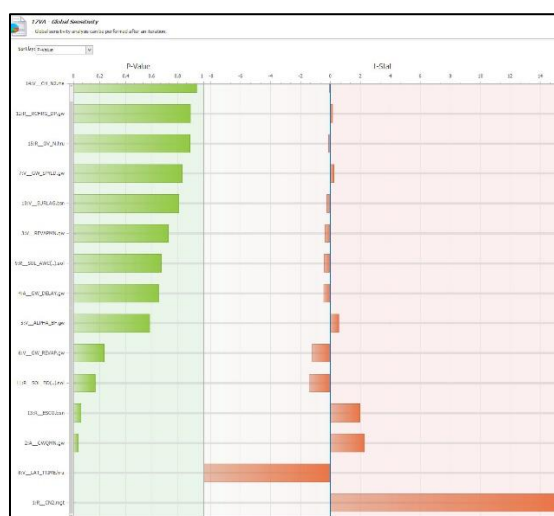
Indicadores estadísticos de la validación ante el escenario 5.

R2	NS	PBIAS	KGE
0.81	0.71	22.4	0.65

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 59.

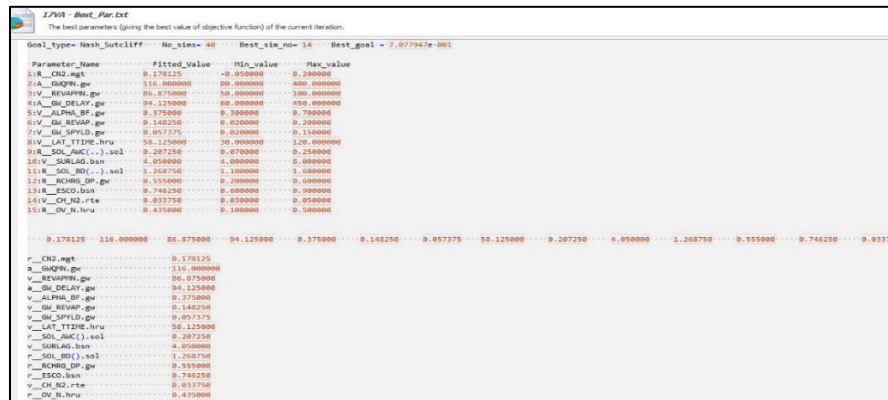
Sensibilidad de los parámetros ante el escenario 5.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 60,

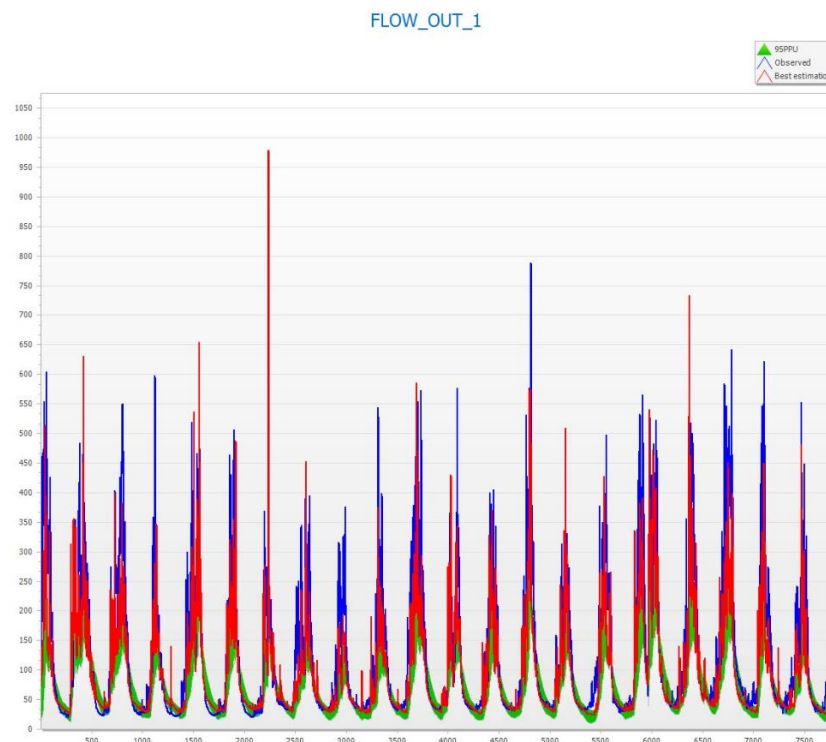
Mejores resultados ante el escenario 5.



Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 61.

Correlación de los caudales ante el escenario 5.



Fuente. *Elaboración propia.*

4.3.4 Resumen de resultados

Tabla 51.

Resumen de resultados según los escenarios.

Escenarios	INDICADORES ESTADISTICOS			
	R2	NS	PBIAS	KGE
Escenario 1	0.78	0.67	29.2	0.6
Escenario 2	0.81	0.78	13.7	0.83
Escenario 3	0.54	0.1	56.8	0.13
Escenario 4	0.82	0.77	23	0.74
Escenario 5	0.81	0.71	22.4	0.65

Fuente. *Elaboración propia.*

Teniendo en cuenta la aceptabilidad de cada parámetro:

Tabla 52.

Rangos de aceptabilidad del R2

Indicador	Valor	Interpretación
R2	0.9-1.0	Excelente ajuste
	0.7-0.9	Buen ajuste
	0.5-0.7	Aceptable
	0.0-0.5	Insatisfactorio

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 53.

Rangos aceptabilidad del NS

Indicador	Rango	Interpretación
NS	> 0.75	Excelente ajuste
	0.65 - 0.75	Buen ajuste
	0.50 - 0.65	Aceptable

0.00 - 0.50	Insatisfactorio
-------------	-----------------

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 54.

Rangos de aceptabilidad PBIAS

Indicador	Rango	Interpretación
PBIAS	±10%	Muy bueno
	±15%	Bueno
	±25%	Satisfactorio
	> ±25%	Insatisfactorio

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 55.

Rangos de aceptabilidad de KGE

Indicador	Rango	Interpretación
KGE	> 0.75	Excelente ajuste
	0.65 - 0.75	Buen ajuste
	0.50 - 0.65	Aceptable
	0.0 - 0.50	Insatisfactorio

Fuente. *Elaboración propia.*

Con base en la evaluación de los escenarios analizados, se concluye que el escenario 2 presenta los mejores indicadores estadísticos de ajuste del modelo. Sin embargo, en este escenario se consideran muy pocos parámetros para el análisis, lo cual limita su representatividad. Por otro lado, considerando que el enfoque principal de esta investigación es la relación precipitación-escorrentía, así como la adecuada representación del flujo base y la

calibración de los parámetros que mejor describen este proceso hidrológico, el escenario 5 se ajusta de manera más adecuada a los objetivos del estudio.

4.4 Determinación del grado de correlación entre los caudales generados y simulados

Para evaluar la confiabilidad del modelo hidrológico SWAT, se ha comparado los caudales simulados con los observados mediante indicadores estadísticos que cuantifican el grado de correlación entre ambas series de datos.

En este estudio, los mejores resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 56.

Resumen de resultados

Métrica	Valor
R²	0.81
NS (Nash-Sutcliffe)	0.71
PBIAS	22.4
KGE	0.65

Fuente. *Elaboración propia.*

4.4.1 Evaluación de la correlación y ajuste del modelo.

5.4.1.1 Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$ indica una fuerte relación entre los caudales simulados y observados, reflejando que el modelo explica el 81 % de la variabilidad en los caudales.

4.4.1.2 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)

El coeficiente Nash-Sutcliffe $NS = 0.71$ demuestra que el modelo tiene una alta capacidad predictiva, lo que indica un buen desempeño en la simulación de los caudales.

4.4.1.3 Sesgo de porcentaje medio (PBIAS)

Es un indicador estadístico que evalúa la tendencia de los valores simulados con respecto a los observados en un modelo hidrológico, como el SWAT. Mide el sesgo porcentual promedio entre las dos series de datos, mostrando si el modelo sobreestima o subestima los valores reales. El $PBIAS = 22.4 \%$ sugiere una ligera sobreestimación de los caudales simulados con respecto a los observados, manteniéndose dentro de un rango aceptable para la modelación hidrológica.

4.4.1.4 Índice de Kling-Gupta (KGE)

El $KGE = 0.65$ confirma la confiabilidad del modelo, indicando una representación adecuada de la correlación, el sesgo y la variabilidad de los caudales en la cuenca.

En conclusión, estos resultados evidencian que el modelo SWAT reproduce de manera precisa la relación precipitación-escurrimiento en la estación hidrométrica del km 105, validando su aplicabilidad en la simulación hidrológica de la zona de estudio.

4.4.2 Parámetros estadísticos y rangos de aceptabilidad.

Tabla 57.

Resultados de parámetros estadísticos y rangos de aceptabilidad

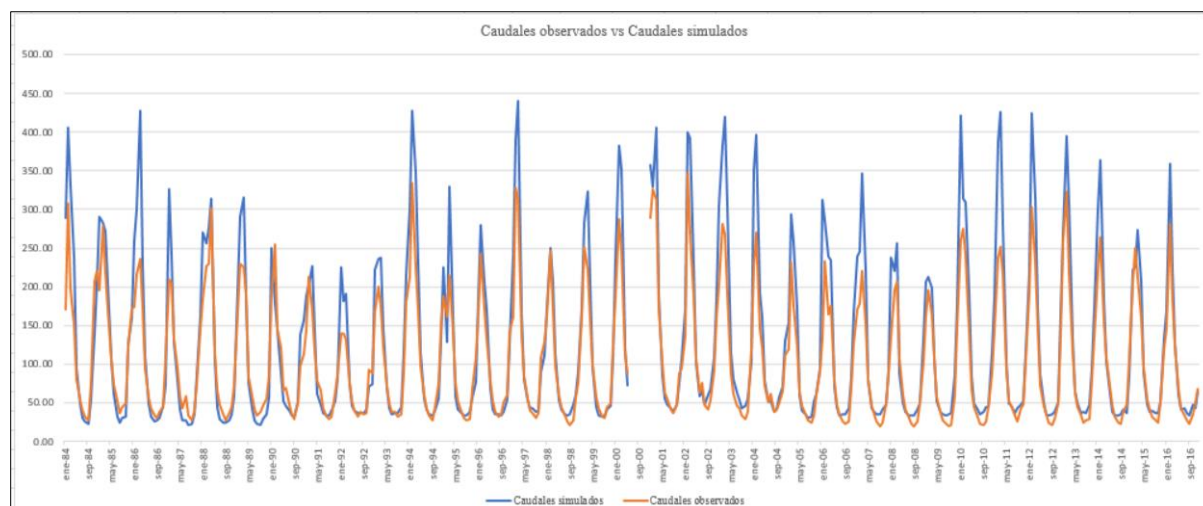
Parámetro	Interpretación	Rango de un buen modelo	Resultado obtenido	¿Es aceptable?
-----------	----------------	-------------------------	--------------------	----------------

R ² (Coeficiente de determinación)	Mide el ajuste de los datos simulados respecto a los observados.	≥ 0.50 (aceptable), ≥ 0.70 (muy bueno)	0.81	✓ Acceptable
NS (Nash-Sutcliffe Efficiency)	Evalúa la capacidad del modelo para predecir caudales.	≥ 0.50 (aceptable), ≥ 0.75 (muy bueno)	0.71	✓ Acceptable
PBIAS (Porcentaje de Sesgo)	Mide la tendencia del modelo a sobrestimar (+) o subestimar (-) caudales.	$\pm 10\%$ (óptimo), $\pm 15\%$ (bueno), $\pm 25\%$ (aceptable)	22.4%	✓ Acceptable
KGE (Índice Kling-Gupta)	Índice compuesto de correlación, sesgo y variabilidad.	≥ 0.50 (aceptable), ≥ 0.75 (muy bueno)	0.65	✓ Acceptable

Fuente. *Elaboración propia.*

Figura 62.

Caudales simulados vs Caudales observados ante el mejor escenario



Fuente. *Elaboración propia.*

4.5 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales observados y caudales simulados

5.5.1 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales observados

Para realizar el análisis de la amplitud y frecuencia se optó por realizar un análisis de los caudales anuales máximos y mínimos de los años de 1984-2016 tomados en la estación hidrométrica del km 105.

Los promedios anuales de los caudales registrados en la estación hidrométrica del km 105 son los siguientes:

Tabla 58.

Promedio anual de caudales máximos y mínimos observados

AÑOS	CAUDALES MAXIMOS	CAUDALES MINIMOS
1984	603	20
1985	483	22
1986	549.25	23.5
1987	596.75	21
1988	518	22.5
1989	505.5	19.5
1990	366.75	31.63
1991	401.75	31.85
1992	374.25	30.846
1993	542.75	31.19
1994	571.25	32.07
1995	575	31.278
1996	403.75	30.975
1997	787.5	35.05
1998	435.5	32
1999	496.33	28
2000	563.63	56.5
2001	529.25	35.25
2002	650.25	42.5
2003	641	33.5
2004	621	26
2005	551.5	28
2006	613	32.415
2007	516.5	32.195

2008	396.79	32.31
2009	358.92	32.31
2010	1100	31.315
2011	603.66	33.95
2012	678.8	31.85
2013	599.36	33.255
2014	534.17	30.045
2015	446.14	29.9
2016	621.75	27.43

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 59.

Promedio histórico anual de caudales de la estación hidrométrica del km 105.

AÑO	CAUDALES MAX	CAUDALES MIN
Promedio Histórico	552.61	30.67

Fuente. *Elaboración propia.*

Se puede apreciar que los meses con mayores caudales por época de lluvias fuertes, oscilan entre los meses de enero-marzo.

Tabla 60.*Datos promedio de caudales mensuales del año 1984-1999*

1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
274.70	291.21	259.21	326.58	270.13	196.85	250.78	188.30	225.25	221.57	299.86	225.80	185.80	239.97	172.07	172.42
406.38	282.83	300.15	241.38	256.59	291.30	178.93	202.34	180.75	236.05	428.23	128.47	279.38	390.92	250.38	282.72
330.93	271.52	426.84	128.21	276.10	315.72	143.83	226.94	191.13	237.62	345.96	329.23	205.86	440.23	205.69	322.62
238.17	204.55	226.62	78.68	313.77	184.95	88.11	142.80	75.47	145.23	227.73	161.55	168.80	163.84	112.53	201.28
94.37	104.88	109.68	41.15	106.16	75.32	51.95	62.11	46.45	69.76	114.26	58.83	69.47	81.01	53.63	95.47
48.43	61.34	49.23	27.58	45.13	43.67	46.58	47.11	39.24	42.45	55.39	41.54	42.10	53.43	41.03	45.14
30.83	31.40	32.23	27.04	29.62	27.37	39.24	36.56	37.18	35.32	41.39	36.08	35.14	43.58	35.02	34.05
26.36	24.22	26.17	21.66	24.22	22.88	33.63	33.27	36.80	36.72	34.95	33.01	34.82	42.73	33.72	31.68
22.40	30.54	27.93	23.03	24.16	21.63	32.70	33.30	36.89	36.56	33.22	33.97	33.51	37.90	35.28	34.19
53.11	31.60	29.77	34.34	27.77	29.18	50.13	39.15	41.67	43.89	40.01	38.10	37.45	40.09	47.01	40.76
140.23	126.53	46.39	84.23	34.34	35.01	137.89	52.94	70.67	113.81	54.94	57.13	54.53	89.91	59.39	45.86
206.20	160.42	72.43	163.02	59.20	57.41	156.44	81.18	73.91	215.79	133.95	77.39	126.66	111.76	90.34	109.56

Fuente. Tomado de información proporcionado por EGEMSA

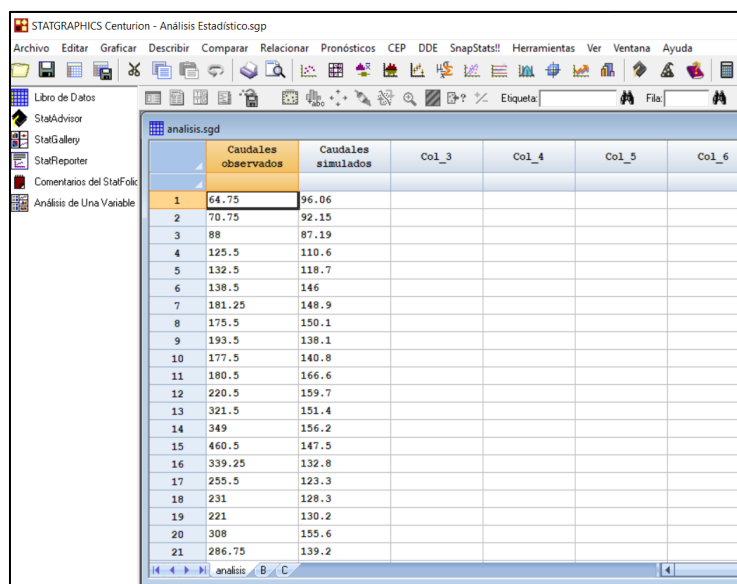
Tabla 61.*Datos promedio de caudales mensuales del año 2000-2016*

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
235.35	357.50	171.12	304.62	351.08	153.02	311.96	238.42	237.22	206.72	421.70	186.30	218.66	266.54	300.22	222.74	169.54
382.60	329.76	399.32	382.86	397.06	293.55	285.72	246.04	220.83	213.19	313.30	386.78	425.05	394.95	363.07	224.66	358.58
351.27	405.69	392.06	419.51	192.27	257.31	239.65	347.36	256.07	198.01	308.98	426.66	314.16	305.37	182.91	274.16	221.58
120.23	188.70	228.70	303.96	160.07	171.91	235.00	219.79	87.60	108.26	191.01	280.09	172.29	133.90	104.10	206.86	127.69
72.25	84.29	101.52	114.53	78.73	59.27	71.04	79.31	49.11	52.07	84.41	100.29	86.44	64.81	63.84	90.08	59.31
	55.70	58.28	79.65	51.59	39.20	44.00	43.39	37.51	37.68	49.45	48.64	51.43	49.18	38.92	47.96	40.70
	48.10	66.77	63.49	52.51	35.60	33.92	37.95	33.73	34.77	41.70	45.80	35.28	36.62	34.14	37.81	42.20
	42.75	47.17	54.21	37.61	31.15	35.58	35.34	33.67	33.17	34.86	36.65	33.30	37.59	33.80	39.73	36.32
	38.48	59.73	43.00	41.93	32.32	35.84	35.83	34.32	34.71	38.41	43.02	34.70	36.09	34.85	36.78	33.09
	47.56	68.13	45.60	56.48	51.83	43.60	40.72	41.25	36.11	44.75	48.29	37.65	47.91	40.71	36.80	48.33
	75.39	108.74	54.90	70.84	62.28	82.46	47.55	48.40	85.66	44.22	52.98	51.18	94.22	36.57	51.85	42.74
	106.28	184.14	102.87	130.83	94.51	166.08	92.31	132.13	177.35	113.95	114.68	164.48	212.94	84.47	133.32	64.89

Fuente. Tomado de información proporcionado por EGEMSA

Para describir de mejor forma los datos de los caudales observados, se les sometieron a un análisis estadístico, con ayuda del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.

Figura 63.
Interfaz del software STATGRAPHICS



The screenshot shows the STATGRAPHICS Centurion XVI software interface. The main window displays a data table with the following columns: 'Caudales observados', 'Caudales simulados', 'Col_3', 'Col_4', 'Col_5', and 'Col_6'. The data is organized into rows, with the first row highlighted in orange. The table contains 21 rows of data, with the first row showing values of 64.75 for observed and 96.06 for simulated discharges.

	Caudales observados	Caudales simulados	Col_3	Col_4	Col_5	Col_6
1	64.75	96.06				
2	70.75	92.15				
3	88	87.19				
4	125.5	110.6				
5	132.5	118.7				
6	138.5	146				
7	181.25	148.9				
8	175.5	150.1				
9	193.5	138.1				
10	177.5	140.8				
11	180.5	166.6				
12	220.5	159.7				
13	321.5	151.4				
14	349	156.2				
15	460.5	147.5				
16	339.25	132.8				
17	255.5	123.3				
18	231	128.3				
19	221	130.2				
20	308	155.6				
21	286.75	139.2				

Fuente. Tomado de STATGRAPHICS

En el que se muestran los siguientes resultados obtenidos:

Tabla 62.
Resumen estadístico para Caudales Observados

Resumen estadístico para Caudales Observados	
Recuento	7792
Promedio	124.49
Mediana	67.21
Desviación Estándar	119.185
Mínimo	19.5
Máximo	787.5
Rango	768

Fuente. Adaptado de STATGRAPHICS

El análisis estadístico de los caudales observados se realizó sobre un total de 7792 registros, lo que proporciona una base sólida y representativa para caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio. El promedio de caudal fue de 124.49 m³/s, lo que indica el valor medio de caudal durante el periodo analizado y sirve como referencia para estimar la disponibilidad hídrica general. Sin embargo, la distribución de los caudales no es simétrica, como lo evidencia la diferencia notable entre la media y la mediana de 67.21, que representa el valor central de la serie y es menos afectada por valores extremos o eventos atípicos. Esta diferencia sugiere la presencia de caudales muy altos que elevan la media, pero que no son frecuentes.

La desviación estándar de 119.185 refleja una alta variabilidad en los caudales, lo que es característico de sistemas fluviales con regímenes hidrológicos marcadamente estacionales o sujetos a eventos extremos, como crecidas o sequías prolongadas. Esta dispersión indica que los caudales pueden fluctuar ampliamente alrededor del valor promedio, lo que tiene implicaciones importantes para la gestión y planificación de recursos hídricos, especialmente en términos de diseño de infraestructuras y manejo de riesgos.

Los valores extremos registrados muestran un caudal mínimo de 19.5, que representa condiciones de bajo flujo o estiaje, y un caudal máximo de 787.5, asociado a eventos de crecida o avenidas extraordinarias. La diferencia entre estos valores, expresada a través del rango de 768.0, confirma la amplia amplitud de caudales que pueden presentarse en la cuenca, reflejando la dinámica natural del sistema fluvial y la influencia de factores climáticos y geomorfológicos.

Este conjunto de indicadores estadísticos es fundamental para comprender la naturaleza del régimen de caudales, ya que permite identificar tanto la tendencia central como la

variabilidad y los extremos, elementos clave para el análisis de amplitud y frecuencia de caudales. Además, estos resultados pueden ser la base para aplicar modelos hidrológicos, realizar análisis de riesgo hidráulico y diseñar estructuras hidráulicas adecuadas a las condiciones reales del río.

Figura 64.

Tabla de frecuencias para Caudales Observados

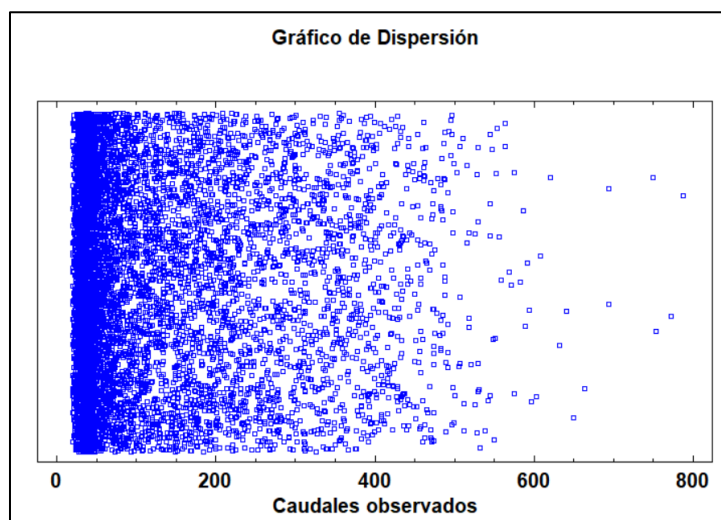
Tabla de Frecuencias para Caudales observados							
Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
	menor o igual	0		0	0.0000	0	0.0000
1	0	56.4286	28.2143	3444	0.4420	3444	0.4420
2	56.4286	112.857	84.6429	1493	0.1916	4937	0.6336
3	112.857	169.286	141.071	776	0.0996	5713	0.7332
4	169.286	225.714	197.5	651	0.0835	6364	0.8167
5	225.714	282.143	253.929	449	0.0576	6813	0.8744
6	282.143	338.571	310.357	338	0.0434	7151	0.9177
7	338.571	395.0	366.786	307	0.0394	7458	0.9571
8	395.0	451.429	423.214	170	0.0218	7628	0.9790
9	451.429	507.857	479.643	106	0.0136	7734	0.9926
10	507.857	564.286	536.071	35	0.0045	7769	0.9970
11	564.286	620.714	592.5	12	0.0015	7781	0.9986
12	620.714	677.143	648.929	5	0.0006	7786	0.9992
13	677.143	733.571	705.357	2	0.0003	7788	0.9995
14	733.571	790.0	761.786	4	0.0005	7792	1.0000
	mayor de	790.0		0	0.0000	7792	1.0000

Media = 124.489 Desviación Estándar = 119.185

Fuente. Tomado de STATGRAPHICS

Figura 65.

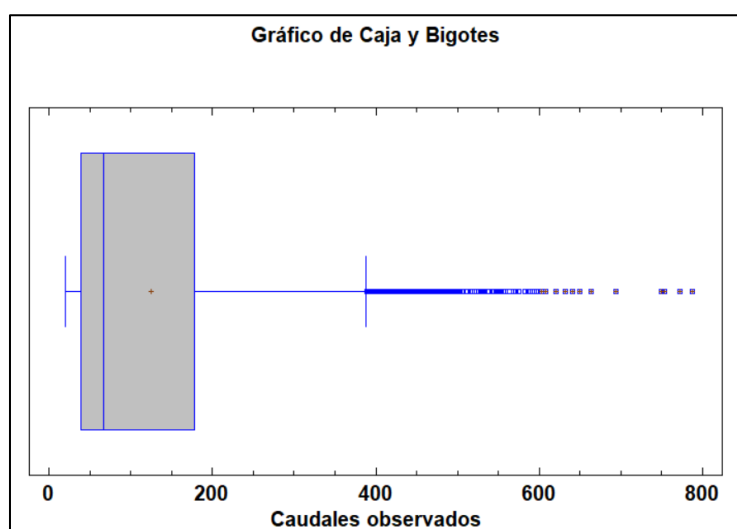
Gráfico de Dispersión - Caudales observados



Fuente. *Tomado de STATGRAFHICS*

Figura 66.

Gráfico de caja y bigotes

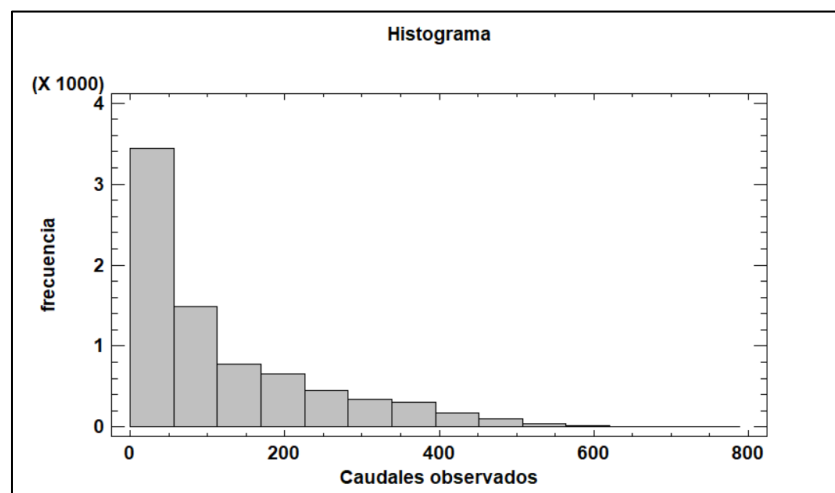


Fuente. *Tomado de STATGRAFHICS*

El diagrama de caja y bigotes de los caudales observados muestra una distribución sesgada hacia la derecha, con la mayoría de los valores concentrados en rangos bajos a moderados y una mediana cercana al primer cuartil. Además, se identifican numerosos valores atípicos correspondientes a caudales significativamente altos, lo que indica la presencia frecuente de eventos extremos o crecidas en la serie de datos. Esta distribución refleja la variabilidad típica de los caudales y resalta la importancia de considerar estos eventos extremos en el análisis hidrológico y la gestión del recurso.

Figura 67.

Histograma de Frecuencia - Caudales observados



Fuente. *Tomado de STATGRAPHICS*

4.5.2 Análisis de la amplitud - frecuencia de los caudales simulados

Para realizar el análisis de la amplitud, se optó por realizar un análisis de los caudales máximos y mínimos de los años de 1984-2016, simulados por el modelo SWAT, registrados en el km 105, divididos en el periodo de calibración y validación.

En la siguiente tabla se muestra los caudales máximos y mínimo por año:

Tabla 63.

Caudales máximos y mínimo por año

Año	Caudales máximos	Caudales mínimos
1984	502.9	23.873
1985	608.8	29.49
1986	357.2	27.1
1987	330.8	25.57
1988	627.6	26.59
1989	471.1	31.81
1990	911.9	27.35
1991	419.7	25.69
1992	206.8	24.02
1993	352.6	30.17
1994	554.7	25.66
1995	393.5	24.07
1996	349.2	29.58
1997	561.1	27.49
1998	468.8	20.07
1999	410.3	25.46
2000	377.8	87.96
2001	503.1	34.73
2002	679.1	37.53
2003	435.8	27.66
2004	432.5	33.72
2005	438.2	22.48
2006	498.6	15.20
2007	336.4	19.12
2008	285.3	18.53
2009	231.3	18.67
2010	581.9	20.71
2011	352.2	23.87
2012	503	19.83

2013	449.3	22.85
2014	370.8	21.64
2015	366.1	23.02
2016	437.9	21.09

Fuente. *Elaboración propia.*

Los promedios de caudales máximos anuales son los siguientes:

Tabla 64.

Caudal máximo y mínimo promedio

Caudal Promedio	Valor (m3/s)
Caudal máximo anual promedio	463.7
Caudal mínimo anual promedio	27.00

Fuente. *Elaboración propia.*

Para realizar el análisis de la frecuencia de caudales, se optó por realizar un gráfico que nos muestra la frecuencia de los caudales elevados de los años de 1984-2016, simulados por el modelo SWAT, registrados en el km 105. Siendo los eventos que más se presencian entre los meses de Enero y Marzo.

En la siguiente tabla se muestra los caudales medios simulados durante los años 1984 – 2016.

Tabla 65.

Caudales medios simulados 1984- 1994 Periodo de calibración

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
ENERO	156.27	181.02	158.53	194.66	169.36	152.19	170.64	128.83	124.71	151.79	196.98
FEBRERO	292.10	262.84	201.15	189.48	211.67	214.33	239.12	197.91	125.16	184.91	319.36
MARZO	181.55	203.35	220.41	118.83	214.40	209.51	129.14	154.59	116.48	158.83	209.60

ABRIL	136.04	155.22	156.40	78.70	286.42	173.79	105.93	101.64	61.16	107.48	153.72
MAYO	65.64	89.57	78.89	43.42	99.49	68.19	51.14	64.15	36.99	57.38	81.84
JUNIO	39.05	59.07	41.99	27.33	51.66	43.46	54.09	51.17	25.46	34.82	45.04
JULIO	25.28	36.64	27.34	44.08	31.82	26.86	32.33	27.32	16.94	22.71	28.58
AGOSTO	17.08	21.89	17.83	18.61	19.92	18.34	19.79	16.29	22.68	22.91	17.98
SEPTIEMBRE	12.75	29.66	15.83	12.28	12.52	23.47	14.59	13.50	19.66	16.79	11.78
OCTUBRE	59.17	34.52	23.24	24.64	21.66	30.39	34.50	17.03	22.18	19.69	29.43
NOVIEMBRE	191.44	107.10	29.04	60.01	29.65	39.60	82.81	48.53	77.53	75.31	59.06
DICIEMBRE	205.54	156.84	91.68	130.71	56.92	70.40	98.45	71.57	73.84	165.11	133.50

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 66.

Caudales medios simulados 1995- 2005 Periodo de calibración

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
ENERO	172.14	148.97	146.22	147.83	145.85	171.41	273.45	121.96	186.34	211.26	104.98
FEBRERO	145.89	227.26	312.77	232.08	236.78	273.19	312.04	332.58	266.05	255.94	216.42
MARZO	199.03	157.69	298.25	158.75	206.92	230.86	298.01	254.49	252.56	130.51	159.90
ABRIL	127.11	116.99	122.66	81.95	139.75	95.83	156.83	172.73	176.44	105.69	109.51
MAYO	60.25	63.15	70.39	44.57	84.08	73.65	86.23	91.95	73.69	57.07	49.81
JUNIO	36.88	36.74	39.86	28.87	42.69		47.56	48.89	46.30	36.45	31.13
JULIO	23.96	23.58	25.43	18.48	27.30		40.83	60.98	30.25	46.15	20.31
AGOSTO	15.09	16.78	21.20	10.60	16.48		26.60	31.99	27.48	22.94	12.74
SEPTIEMBRE	12.43	20.25	14.97	6.48	14.85		22.13	27.11	18.15	26.92	9.01
OCTUBRE	14.32	34.94	22.10	12.71	29.00		32.93	38.97	14.28	33.87	19.07
NOVIEMBRE	52.15	45.39	93.06	41.25	33.67		72.29	75.88	23.17	49.42	46.48
DICIEMBRE	92.82	125.48	113.63	60.31	112.25		80.06	146.82	105.18	96.10	74.47

Fuente. *Elaboración propia.*

Tabla 67.

Caudales medios simulados 2006- 2016 Periodo de validación

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ENERO	117.77	156.00	120.06	146.15	246.57	128.49	176.99	243.26	206.15	190.29	130.55
FEBRERO	217.65	164.15	180.81	180.75	259.28	223.33	288.26	308.79	249.30	234.84	266.63
MARZO	149.12	204.76	190.84	148.89	225.87	236.04	214.87	201.96	140.77	198.21	168.50
ABRIL	159.90	136.68	91.44	91.71	125.29	201.04	131.60	103.16	93.07	145.14	108.64
MAYO	63.62	65.09	45.62	42.31	52.87	76.60	57.54	48.53	55.27	80.28	53.38
JUNIO	32.05	31.72	26.61	22.85	28.88	37.15	31.62	29.67	30.79	38.36	27.73
JULIO	19.86	19.47	15.30	11.71	16.76	30.26	19.98	18.29	16.81	25.83	18.89
AGOSTO	10.56	11.23	7.73	7.35	8.35	17.93	9.69	9.91	9.16	17.23	12.39
SEPTIEMBRE	7.10	5.29	4.52	4.24	6.82	11.35	5.41	12.78	7.29	11.67	7.09
OCTUBRE	10.93	9.78	10.14	6.11	10.13	27.58	13.22	13.95	23.51	9.02	20.01
NOVIEMBRE	55.91	33.78	34.14	43.47	29.62	32.93	33.93	65.54	31.96	35.06	36.42
DICIEMBRE	111.97	72.51	86.94	133.11	72.97	88.11	119.86	148.59	89.68	104.70	52.87

Fuente. *Elaboración propia.*

Para describir de mejor forma los datos de los caudales simulados, se les sometieron a un análisis estadístico, con ayuda del programa STATGRAFHICS Centurion XVI.

En el que se muestran los siguientes resultados obtenidos:

Tabla 68.

Resumen estadístico para Caudales Observados

Resumen estadístico para Caudales Simulados	
Recuento	7792
Promedio	92.48
Mediana	57.55
Desviación Estándar	87.39
Mínimo	5.07
Máximo	911.9
Rango	906.83

Fuente. *Adaptado de STATGRAFHICS*

El análisis estadístico de los caudales simulados se realizó sobre un conjunto de 7792 registros, lo que garantiza una base de datos robusta y suficiente para evaluar el comportamiento hidrológico estimado por el modelo. El promedio de los caudales simulados es de 92.48 m³/s, lo que representa el valor medio de caudal proyectado bajo las condiciones y parámetros utilizados en la simulación. Este valor promedio es menor que el observado en los datos reales, lo que puede indicar que el modelo tiende a subestimar los caudales en comparación con las observaciones, o bien que reproduce un régimen más conservador.

La mediana de los caudales simulados es de 57.55, situándose por debajo del promedio. Esta diferencia entre la media y la mediana sugiere una distribución asimétrica, donde existen

algunos valores altos que elevan la media, pero la mayoría de los caudales simulados se concentra en valores más bajos. Este comportamiento puede ser típico en cuencas donde predominan los caudales bajos y los eventos extremos son poco frecuentes, o bien una característica propia del modelo utilizado.

La desviación estándar de 87.39 refleja una variabilidad considerable, aunque menor que la observada en los caudales reales. Esta menor dispersión puede deberse a que el modelo suaviza los extremos y tiende a reproducir menos variabilidad que la que ocurre en la naturaleza. No obstante, la existencia de fluctuaciones importantes en los caudales simulados evidencia que el modelo es capaz de captar, al menos en parte, la dinámica hidrológica de la cuenca.

En cuanto a los valores extremos, el caudal mínimo simulado es de 5.07, lo que indica que el modelo reproduce condiciones de estiaje o bajo flujo más severas que las observadas en los datos reales. Por otro lado, el caudal máximo alcanza los 911.9, superando incluso al máximo observado en la serie real. Esto puede señalar que el modelo, aunque tiende a subestimar los valores centrales, es capaz de simular eventos extremos de gran magnitud, posiblemente en respuesta a condiciones meteorológicas o hidrológicas excepcionales introducidas en la simulación.

El rango de los caudales simulados es de 906.83, lo que representa la diferencia entre el valor máximo y mínimo y evidencia la amplia amplitud de caudales que el modelo puede generar. Esta amplitud es incluso mayor que la observada en los datos reales, lo que sugiere que el modelo tiene la capacidad de simular tanto condiciones de sequía extrema como eventos de crecida significativos.

Figura 68.

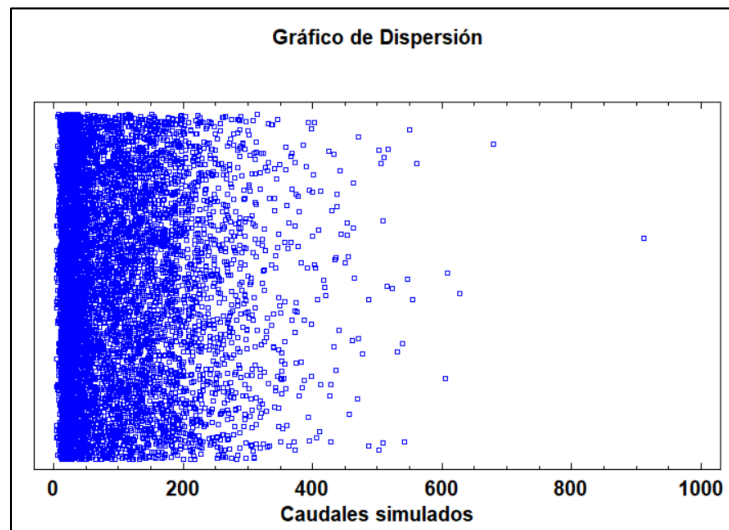
Tabla de frecuencia para Caudales Simulados

Tabla de Frecuencias para Caudales simulados							
Clase	Limite Inferior	Limite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
	menor o igual	0		0	0.0000	0	0.0000
1	0	67.8571	33.9286	4216	0.5411	4216	0.5411
2	67.8571	135.714	101.786	1591	0.2042	5807	0.7453
3	135.714	203.571	169.643	1108	0.1422	6915	0.8874
4	203.571	271.429	237.5	519	0.0666	7434	0.9541
5	271.429	339.286	305.357	214	0.0275	7648	0.9815
6	339.286	407.143	373.214	86	0.0110	7734	0.9926
7	407.143	475.0	441.071	34	0.0044	7768	0.9969
8	475.0	542.857	508.929	15	0.0019	7783	0.9988
9	542.857	610.714	576.786	6	0.0008	7789	0.9996
10	610.714	678.571	644.643	1	0.0001	7790	0.9997
11	678.571	746.429	712.5	1	0.0001	7791	0.9999
12	746.429	814.286	780.357	0	0.0000	7791	0.9999
13	814.286	882.143	848.214	0	0.0000	7791	0.9999
14	882.143	950.0	916.071	1	0.0001	7792	1.0000
	mayor de	950.0		0	0.0000	7792	1.0000
Media = 92.4796 Desviación Estándar = 87.3933							

Fuente. Tomado de STATGRAPHICS

Figura 69.

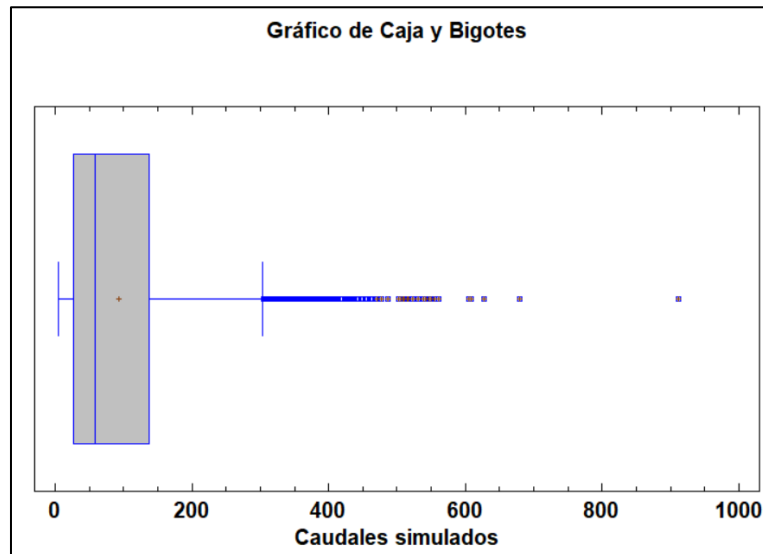
Gráfico de dispersión - Caudales simulados



Fuente. Tomado de STATGRAPHICS

Figura 70.

Gráfico de caja y bigotes - Caudales simulados

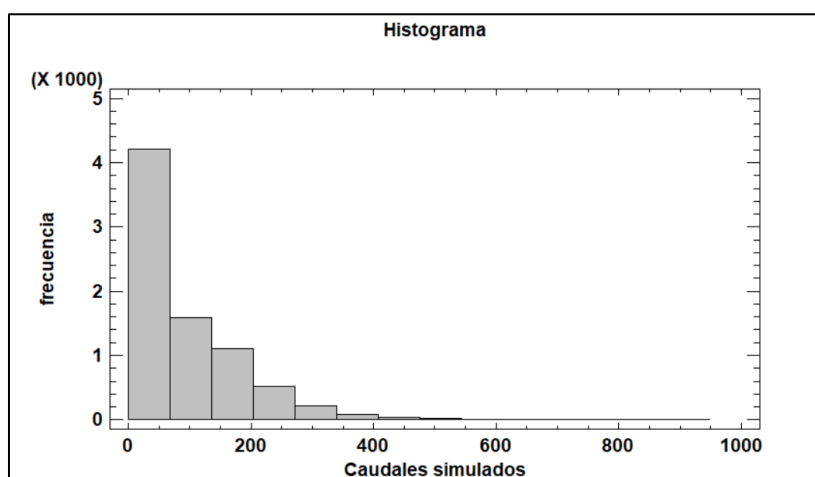


Fuente. *Tomado de STATGRAFHICS*

El diagrama de caja y bigotes de los caudales simulados revela una distribución marcadamente sesgada hacia la derecha, con la mayor parte de los valores concentrados en rangos bajos y una mediana cercana al primer cuartil. Se observa una cantidad considerable de valores atípicos hacia la derecha, correspondientes a caudales simulados significativamente altos. Esta dispersión indica que, al igual que en los datos observados, el modelo simula eventos extremos o crecidas, reflejando la alta variabilidad de los caudales en el sistema analizado.

Figura 71.

Histograma de Frecuencia - Caudales simulados



Fuente. *Tomado de STATGRAFHICS*

4.5.2 Análisis de la correlación entre los caudales observados y caudales simulados

Para evaluar el desempeño del modelo SWAT en la simulación de caudales, se realizó un análisis de correlación entre los caudales observados y los caudales simulados utilizando el software Statgraphics. Este análisis permitió cuantificar el grado de asociación lineal entre ambas series de datos. Estos resultados reflejan el grado de ajuste del modelo y su capacidad para representar adecuadamente la dinámica hidrológica observada en la estación del km 105.

Tabla 69.

Resumen Estadístico

Resumen estadístico	Caudales Observados	Caudales Simulados
Recuento	7792	7792
Promedio	124.49	92.48
Mediana	67.21	57.55
Desviación Estándar	119.185	87.39

Mínimo	19.5	5.07
Máximo	787.5	911.9
Rango	768	906.83

Fuente. *Adaptado de STATGRAFHICS*

El modelo hidrológico tiende a subestimar los caudales medios y centrales, pero amplía la amplitud total de la serie simulada, generando tanto valores mínimos más bajos como máximos más altos que los observados. Además, la variabilidad (desviación estándar) es menor en los caudales simulados, lo que sugiere que el modelo suaviza las fluctuaciones intermedias, aunque es capaz de simular eventos extremos. Estas diferencias son fundamentales para la interpretación de los resultados y para la posterior calibración y validación del modelo, ya que impactan directamente en la gestión y planificación de los recursos hídricos de la cuenca.

Figura 72.

Regresión simple - Caudales simulados vs Caudales observados

Regresión Simple - Caudales simulados vs. Caudales observados

Variable dependiente: Caudales simulados

Variable independiente: Caudales observados

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coeficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	10.4665	0.628632	16.6496	0.0000
Pendiente	0.658798	0.00364764	180.609	0.0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4.80334E7	1	4.80334E7	32619.69	0.0000
Residuo	1.1471E7	7790	1472.53		
Total (Corr.)	5.95044E7	7791			

Coeficiente de Correlación = 0.898457

R-cuadrada = 80.7224 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 80.72 por ciento

Error estándar del est. = 38.3735

Error absoluto medio = 22.5692

Estadístico Durbin-Watson = 0.542147 (P=0.0000)

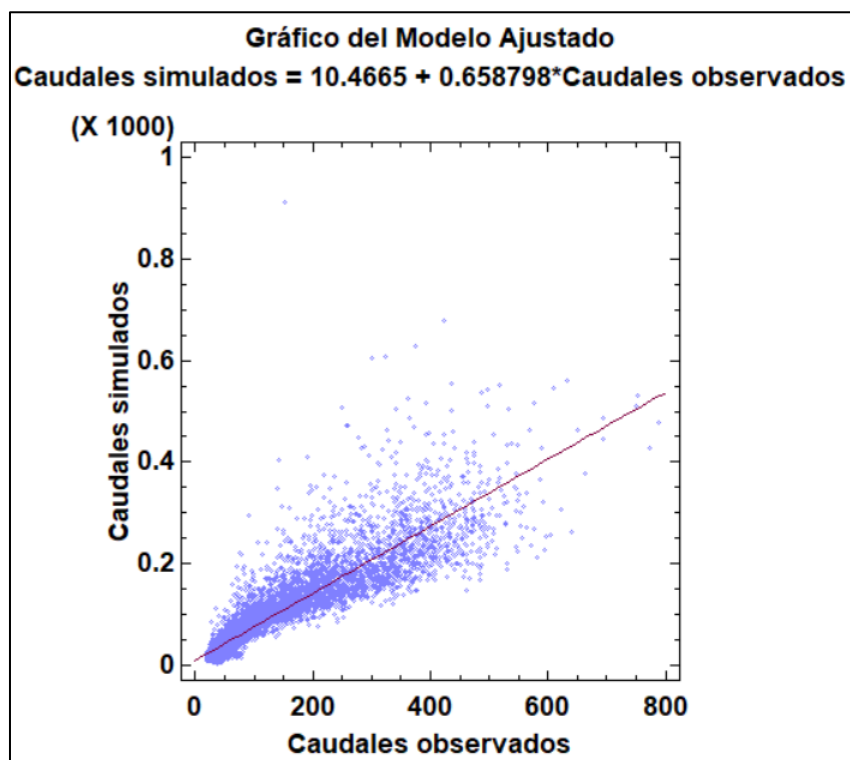
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.72883

Fuente. *Tomado de STATGRAFHICS*

Para evaluar la relación entre los caudales simulados y observados, se realizó un análisis de regresión lineal simple, considerando como variable dependiente los caudales simulados y como variable independiente los caudales observados. El modelo obtenido presenta un intercepto de 10.47 y una pendiente de 0.66, lo que indica que, en promedio, el modelo tiende a subestimar los valores altos de caudal observado, ya que la pendiente es menor a uno. El ajuste del modelo es estadísticamente significativo ($\text{Valor-P} < 0.001$) y presenta un coeficiente de correlación de 0.90, lo que evidencia una fuerte relación lineal entre ambas series de datos. Además, el coeficiente de determinación (R^2) es de 80.7%, lo que significa que el modelo explica más del 80% de la variabilidad de los caudales simulados a partir de los observados, reflejando un desempeño satisfactorio del modelo hidrológico. Sin embargo, el análisis de los residuos muestra una autocorrelación positiva significativa (Durbin-Watson = 0.54), lo que sugiere que existen patrones temporales no capturados completamente por el modelo y que podrían mejorarse mediante ajustes adicionales o la incorporación de variables explicativas. El error absoluto medio de 22.57 unidades indica que, en promedio, las diferencias entre los caudales simulados y observados son relativamente bajas en relación con la magnitud de los caudales analizados. En conjunto, estos resultados demuestran que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente la dinámica general del caudal, aunque existen oportunidades para refinar su precisión en el ajuste de eventos extremos o en la reducción de la autocorrelación de los errores.

Figura 73.

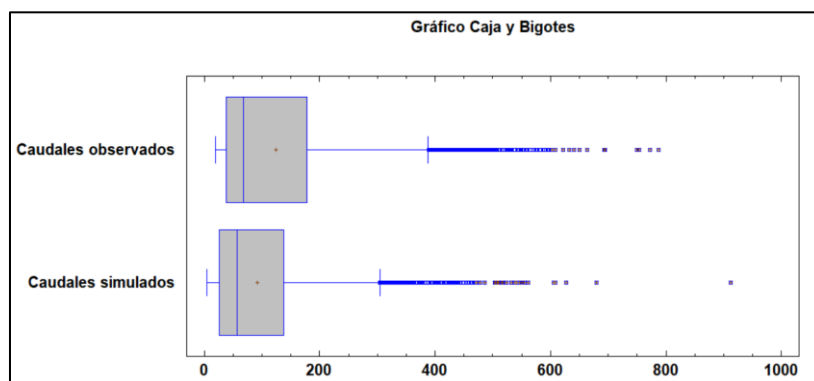
Gráfico del modelo ajustado



Fuente. Tomado de STATGRAFHICS

Figura 74.

Gráfico de caja y bigotes

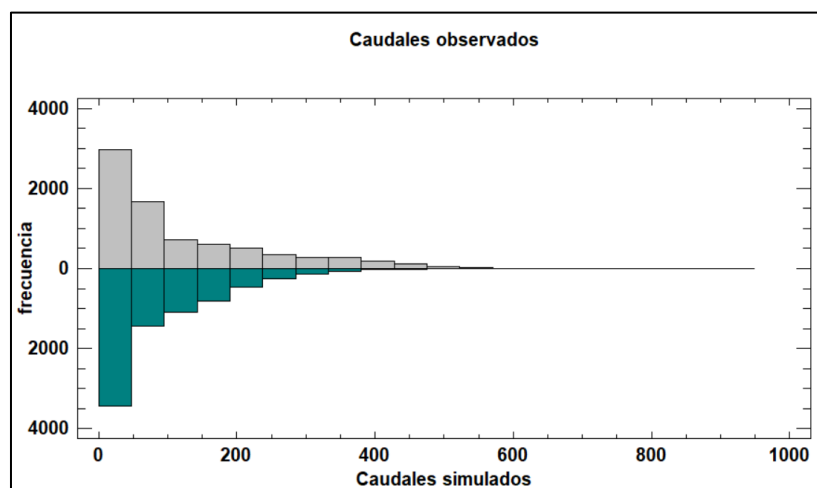


Fuente. *Tomado de STATGRAPHICS*

La comparación entre los diagramas de caja y bigotes de los caudales observados y simulados muestra que ambos conjuntos de datos presentan una distribución similar, caracterizada por una marcada asimetría positiva (sesgo a la derecha). En ambos casos, la mayor parte de los valores se concentra en rangos bajos a moderados, con la mediana ubicada cerca del primer cuartil. Además, se observa una cantidad considerable de valores atípicos hacia la derecha, correspondientes a eventos de caudal significativamente altos. Esta similitud en la dispersión y presencia de valores extremos sugiere que el modelo de simulación logra reproducir adecuadamente la variabilidad y los eventos extremos presentes en los datos observados, lo cual es fundamental para la evaluación hidrológica y la gestión del recurso.

Figura 75.

Frecuencia vs Caudales



Fuente. *Tomado de STATGRAPHICS*

Capítulo V: Discusión de resultados

Según nuestro antecedente internacional, la investigación titulada "Análisis de los caudales líquidos y la generación de sedimentos mediante el modelo SWAT, y su comparación con los registros observados", se llevó a cabo utilizando los parámetros mencionados en el escenario 1. En este estudio, se obtuvieron los siguientes indicadores estadísticos: un $NSE=0.74$, $PBIAS=-5.11$ y $RSR=0.51$ en la etapa de calibración, mientras que en la validación se alcanzó un $NSE=0.62$, $PBIAS=-9.71$ y $RSR=0.28$. De acuerdo con los criterios de desempeño establecidos por Moriasi et al. (2007), estos valores son clasificados como buenos y muy buenos. En nuestro estudio, empleando los mismos parámetros y siguiendo el proceso de calibración y validación, se obtuvieron los siguientes indicadores estadísticos: $R^2=0.78$, $NSE=0.67$, $PBIAS=29.2$, $KGE=0.60$. Según la clasificación de Moriasi et al. (2007), estos valores se catalogan como aceptables, aunque el $PBIAS$ es alto, el NS y KGE indican un ajuste razonable.

Por otro lado, nuestro antecedente nacional, el estudio realizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) titulado "Análisis de la estimación de caudales líquidos y producción de sedimentos con el modelo SWAT y su comparación con datos observados", empleó los parámetros mencionados en el escenario 2. En dicho estudio, los resultados obtenidos fueron un $NSE=0.73$ en la etapa de calibración y un $NSE=0.79$ en la etapa de validación. Asimismo, se reportó un $PBIAS=0.8\%$ en la calibración y un $PBIAS=-2.2\%$ en la validación, lo que indica un desempeño bueno. Aplicando los mismos parámetros en nuestro estudio, los valores obtenidos son los siguientes: $R^2=0.81$, $NSE=0.78$,

PBIAS=13.7 y KGE =0.83; Según la clasificación de Moriasi et al. (2007), estos valores se catalogan como bueno, con NS alto y PBIAS dentro de rangos aceptables.

Asimismo, en la investigación "Uso del modelo SWAT para analizar la hidrología de la cuenca del río Cañete.", realizada por Natalia Uribe, Marcela Quintero y Jefferson Valencia en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) en Cali, Colombia, en marzo de 2013, se utilizaron los parámetros mencionados en el escenario 3. En este estudio, se obtuvo un NSE=0.82 y un $R^2=0.92$ en la estación de Socsi-Regantes. Siguiendo la misma configuración en nuestro análisis, los indicadores obtenidos son $R^2=0.54$, NSE=0.1, PBIAS=56.8 y KGE=0.13, Según la clasificación de Moriasi et al. (2007), estos valores se catalogan como deficiente, con un NS muy bajo y un PBIAS alto, lo que indica una mala calibración.

Además de estos antecedentes, se diseñó el escenario 4 siguiendo las directrices establecidas en el manual de SWAT-CUP, y considerando como enfoque principal el análisis de la relación escorrentía-precipitación. Los resultados obtenidos fueron: $R^2 = 0.82$, NSE = 0.77, PBIAS = 23.00 y KGE = 0.74. De acuerdo con la clasificación propuesta por Moriasi et al. (2007), estos valores son considerados como buenos, aunque el PBIAS presenta un margen de mejora. No obstante, al analizar el gráfico de correlación entre los caudales observados y simulados, se identificó que la representación del flujo base aún requería optimización.

Asimismo, se diseñó el escenario 5 siguiendo las directrices establecidas en el manual de SWAT-CUP, manteniendo como eje principal de análisis la relación escorrentía-precipitación. A diferencia de escenarios anteriores, en este caso se puso especial énfasis en identificar y ajustar los parámetros más sensibles al flujo base, considerando su influencia

directa en la dinámica hidrológica de la cuenca. Los resultados de la validación fueron: $R^2 = 0.81$, $NSE = 0.71$, $PBIAS = 22.40$ y $KGE = 0.65$. Según la clasificación propuesta por Moriasi et al. (2007), estos valores se consideran buenos y aceptables, lo que respalda la validez del ajuste obtenido.

Si bien se obtuvieron buenos resultados tanto en el escenario 2 como en el escenario 4, un análisis más detallado revela ciertas limitaciones en cada uno de ellos. El escenario 2, a pesar de presentar indicadores estadísticos superiores, se basa en un número reducido de parámetros calibrados, lo cual resulta insuficiente para el objetivo principal de esta investigación, que es capturar adecuadamente la sensibilidad de los procesos de precipitación y escorrentía.

Por su parte, en el escenario 4, aunque se incorporan parámetros relevantes a dichos procesos hidrológicos, el análisis del gráfico de correlación evidencia deficiencias en la representación del flujo base, indicando una calibración incompleta de los componentes subterráneos del ciclo hidrológico.

En contraste, el escenario 5, aunque presenta resultados estadísticos ligeramente inferiores a estos dos últimos escenarios mencionados, cumple de manera más equilibrada con los objetivos planteados: sus indicadores (R^2 , NSE , $PBIAS$ y KGE) se encuentran dentro de los rangos considerados buenos y aceptables según Moriasi et al. (2007), y el gráfico de correlación refleja una mejor reproducción del flujo base observado. Esto asegura una representación hidrológica más consistente y realista de la cuenca bajo estudio.

Por tanto, se concluye que el escenario 5 es el más óptimo para la presente investigación, ya que no solo cumple con criterios estadísticos satisfactorios, sino que además garantiza una adecuada caracterización de la relación precipitación-esorrentía, incluyendo un comportamiento representativo del flujo base.

CONCLUSIONES

- Se logró determinar de manera satisfactoria la relación precipitación-escorrentía mediante la calibración del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba. Los indicadores estadísticos obtenidos durante la calibración ($R^2 = 0.81$ indica una fuerte relación entre los caudales simulados y observados, reflejando que el modelo explica el 81 % de la variabilidad en los caudales, $NSE = 0.71$ demuestra que el modelo tiene una alta capacidad predictiva, lo que indica un buen desempeño en la simulación de los caudales, $PBIAS = 22.4 \%$ sugiere una ligera sobreestimación de los caudales simulados con respecto a los observados, manteniéndose dentro de un rango aceptable para la modelación hidrológica, $KGE = 0.65$ confirma la confiabilidad del modelo, indicando una representación adecuada de la correlación, el sesgo y la variabilidad de los caudales en la cuenca) todo esto demuestra que existe una relación directa entre los caudales simulados y observados, confirmando que el modelo representa adecuadamente la dinámica hidrológica de la cuenca en estudio.
- Se determinó la amplitud y frecuencia de los caudales generados por las precipitaciones mediante la simulación con el modelo SWAT. La amplitud fue evaluada a partir de los caudales máximos anuales registrados, observándose picos que alcanzaron hasta 332.58 m³/s en el año 2002 y 308.79 m³/s en el año 2013, principalmente durante los meses de febrero y marzo, los cuales concentran los mayores valores de escorrentía a lo largo del periodo analizado. En cuanto a la frecuencia, se identificaron en promedio entre 1 y 4 eventos anuales de caudal elevado, asociados a la temporada de lluvias (enero a abril), donde se concentran los valores más altos. Los resultados simulados muestran una buena

correspondencia con los registros hidrométricos, validando la capacidad del modelo para reproducir los patrones de escorrentía observados. Sin embargo, la respuesta hidrológica estuvo moderada por las características geomorfológicas de la cuenca, como su pendiente media y forma alargada, que tienden a dispersar los caudales en el tiempo y reducir la velocidad del escurrimiento superficial.

- Se analizó la variación en la amplitud y frecuencia de la escorrentía registrada en la estación del km 105. Se identificó que durante eventos de lluvias intensas (precipitaciones superiores a 20 mm/día), los caudales máximos alcanzaron los 1100 m³/s en el año 2010, como resultado de precipitaciones extraordinarias asociadas a la influencia del fenómeno de El Niño. En comparación, el promedio anual histórico muestra que el caudal máximo promedio registrado fue de 552.61 m³/s. Asimismo, se evidenció una mayor frecuencia de eventos extremos (picos de caudal) durante la temporada de lluvias (enero a marzo). La morfología alargada de la cuenca, combinada con la cobertura vegetal predominante, favorece una menor velocidad de concentración de la escorrentía, lo que prolonga el tiempo de respuesta y atenúa los picos de caudal.
- Se logró determinar de manera precisa el grado de correlación entre los caudales observados y los simulados en la estación hidrométrica del km 105. Los indicadores estadísticos obtenidos durante la calibración, como el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.81$), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe ($NSE = 0.71$), y el error porcentual en el sesgo ($PBIAS = 22.4 \%$), reflejan un alto nivel de ajuste entre ambos conjuntos de datos. Estos valores sugieren que el modelo SWAT tiene una capacidad sólida para simular la relación entre la precipitación y la escorrentía en la cuenca del Urubamba, lo cual respalda

su validez para evaluar el comportamiento hidrológico de la zona y su utilidad para futuras simulaciones y estudios relacionados con la gestión del recurso hídrico en la región.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar explorando y aplicando el uso del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en cuencas altoandinas del Perú, debido a su capacidad para integrar múltiples variables hidrológicas, climáticas y de uso del suelo.
- Es recomendable integrar más variables de entrada al modelo, como la cobertura vegetal actualizada, datos de suelo locales y registros de temperatura, para obtener resultados más ajustados a la realidad.
- Se sugiere desarrollar investigaciones adicionales que analicen el impacto del cambio climático en la dinámica hidrológica de la cuenca Vilcanota–Urubamba, especialmente en escenarios de variabilidad climática extrema.
- Se recomienda utilizar los resultados obtenidos mediante el modelo SWAT como una herramienta de apoyo para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca Vilcanota–Urubamba, particularmente en la identificación de zonas vulnerables a inundaciones o sequías.
- Se sugiere implementar proyectos de reforestación y manejo de suelos en áreas críticas identificadas por el modelo, con el objetivo de mejorar la regulación hídrica y la conservación de los ecosistemas.
- Se recomienda al SENAMHI y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) incrementar el número de estaciones hidrometeorológicas en la cuenca Vilcanota–Urubamba y otras zonas estratégicas del país, priorizando áreas de alta vulnerabilidad hídrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Fernández Palomino, C. (2016). Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota. Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/109>

Traverso, K.; Lavado-Casimiro, W. y Felipe, O. (2022). Monitoreo hidrológico en tiempo cuasi real en la vertiente del Pacífico empleando el modelo hidrológico SWAT. Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1780>

United States Geological Survey. (2022). The water cycle: USGS Water Science School. Recuperado de <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-cycle>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2023). AquaBook: Subsistemas del agua. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de https://aquabook.irrigacion.gov.ar/1019_0

FAO. (2007). Digital Soil Map of the World (DSMW). Recuperado de <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>

Abbas, Salam & Xuan, Yunqing. (2019). Development of a New Quantile-Based Method for the Assessment of Regional Water Resources in a Highly-Regulated River Basin. Water Resources Management. 33. 3187-3210.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73-89.

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute, 7.

Bales, R. C., Molotch, N. P., Painter, T. H., Dettinger, M. D., Rice, R., & Dozier, J. (2006). Mountain hydrology of the western United States. Water Resources Research, 42(8).

Beven, KJ. (2012). Rainfall-runoff modelling: The primer. John Wiley & Sons.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). The Nature and Properties of Soils (13th ed.). Prentice Hall.

Chapman, D. (Ed.). (2021). Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring (2nd ed.). E & FN Spon.

ANA. (s.f.). Ubicación geográfica y política de la Cuenca Vilcanota Urubamba [Fotografía]. Consejo de recurso hídricos de Cuenca Interregional Vilcanota Urubamba: <https://crhc.ana.gob.pe/urubamba/ambito-de-gestion/unidades-hidrograficas-menores>

Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca Urubamba.

Autoridad Nacional del Agua. (2021). Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú. Ministerio de Agricultura, Dirección de conservación y planeamiento de los recursos hídricos, Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1880>

Chow, V., Te, M., & Ways, L. (1994). Hidrología Aplicada (McGRAW-HIL). Santafé de Bogotá, Colombia.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Dirección general de caminos y ferrocarriles, Lima.

Arnold, JG, Moriasi, DN, Gassman, PW, Abbaspour, KC, White, MJ, Srinivasan, R., ... y Jha, MK (2012). SWAT: Uso, calibración y validación del modelo. Transacciones de la ASABE, 55 (4), 1491-1508.

Malik, MA, Dar, AQ y Jain, MK (2022). Modelado del caudal fluvial mediante el modelo SWAT y calibración multisitio utilizando SUFI-2 del modelo SWAT-CUP para cuencas de gran altitud, noroeste del Himalaya. *Modelado de Sistemas Terrestres y Medio Ambiente*, 8 (1), 1203-1213.

Khalid, K., Ali, MF, Abd Rahman, NF, Othman, Z. y Bachok, MF (2018). Evaluación de la calibración del modelo hidrológico distribuido mediante SWAT-CUP. En la Conferencia Regional sobre Ciencia, Tecnología y Ciencias Sociales (RCSTSS 2016), Ciencias Teóricas y Aplicadas (pp. 241-250). Springer Singapur.

Abbaspour, K. C. (2015). SWAT Calibration and Uncertainty Programs. <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>

Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. <https://swat.tamu.edu/docs/>

Arce, C. A. H. (2024). INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN LOS CAUDALES DE ESCORRENTIA EN LA CUENCA DEL RIO VILCANOTA HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO SALCCA, 2022. UNSAAC.

Quispe, M. K. S. (2019). ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RIO PITUMARCA MEDIANTE EL USO DEL MODELO SWAT. PUCP.

Galindo, M. S. (2015). CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA CUENCA DEL RIO SORDO EN EL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO. INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS.

INAIGEM. (2022). MODELAMIENTO HIDROLÓGICO EN LAS MICROCUENCAS SIBINA SALMA Y CCASCCARA Informe final.

Daneshvar, F., Frankenberger, JR, Bowling, LC, Cherkauer, KA y Moraes, AGDL (2021). Desarrollo de una estrategia para el modelado hidrológico SWAT en regiones con escasez de datos del Perú. *Journal of Hydrologic Engineering* , 26 (7), 05021016.

Ortiz, L. (2024). Análisis de los caudales de diseño en relación a los parámetros de modelación en el área hidrocarburífera Puesto Hernández-Chihuido de la Sierra Negra (Bachelor's thesis, Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería).

Valencia, S., Villegas, JC, Hoyos, N., Duque-Villegas, M. y Salazar, JF (2024). Respuesta del caudal fluvial a los cambios en el uso y la cobertura del suelo en los Andes tropicales utilizando múltiples variantes del modelo SWAT. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101888. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101888>.

ANEXOS

A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Anexo 1. Matriz de consistencia.

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA CALIBRANDO EL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL EN LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL KM 105, URUBAMBA 2024					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGIA
Problema general ¿Cuál es la relación precipitación-escorrentía calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?	Objetivo general Analizar la relación precipitación-escorrentía calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.	Hipótesis general La relación de precipitación-escorrentía es directa calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.	Precipitación	Frecuencia y Amplitud	Enfoque y nivel: Cuantitativo Tipo: Investigación Aplicada
Problemas específicos ¿Cómo es la amplitud y la frecuencia de los caudales generados por las precipitaciones aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024? ¿Cómo es la variación en amplitud y frecuencia de la escorrentía en los caudales registrados en la estación	Objetivos específicos Determinar la amplitud y frecuencia en los caudales generados por las precipitaciones aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024. Determinar la variación en amplitud y frecuencia de la escorrentía en los caudales registrados en la estación	Hipótesis específicas La amplitud y frecuencia en los caudales generados por las precipitaciones presentan una concordancia directa con los patrones observados en la cuenca de estudio aplicando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024 La variación en amplitud y frecuencia de la escorrentía en los caudales registrados está asociada a cambios en los patrones de precipitación en la estación	Escorrentía	Frecuencia y Amplitud	Diseño: No experimental Instrumento: Softwares (SWAT, SWAT-CUP Y R) Técnicas: Análisis de series temporales, Calibración y validación

hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?	hidrométrica del km 105 Urubamba 2024.	hidrométrica del km 105 Urubamba 2024.	
¿Cuál es la correlación entre la precipitación y la escorrentía, calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024?	Determinar el grado de correlación entre la precipitación y la escorrentía, calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.	Existe un grado de correlación directa entre la precipitación y la escorrentía, calibrando el modelo Soil and Water Assessment Tool en la estación hidrométrica del km 105, Urubamba 2024.	Población y muestra: Datos hidrometeorológicos del km 105 (36 años), serie de datos diarios

Fuente. Elaboración propia

B. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

B.1 Registro de Caudales Observados en la Estación Hidrométrica del km 105 (Fuente: EGEMSA)

Anexo 2. Solicitud de acceso a la información pública EGEMSA

ANEXO							
Reglamento de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 007-2024-JUS							
SOLICITUD DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA							
Texto Único Ordenado de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 021-2019-JUS							
I. FUNCIONARIO/A RESPONSABLE DE ATENDER LAS SOLICITUDES DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA:							
LUIS FEDERICO COVARRUBIAS CHOCANO							
II. REQUISITOS OBLIGATORIOS DE LA SOLICITUD							
DATOS DE EL/LA SOLICITANTE							
1. NOMBRES Y APELLIDOS/RAZÓN SOCIAL TANIA TITTO PARDO				2. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN/RUC 76847633			
3. DOMICILIO (PRECISAR AV/CALLE/JR/PSJ - N°/DPTO./INT - URBANIZACIÓN - DISTRITO - PROVINCIA - DEPARTAMENTO - PAÍS)							
AV. HUAYRUOPATA N°901-WANCHAQ-CUSCO-PERÚ							
INFORMACIÓN SOLICITADA							
4. PEDIDO CONCRETO Y PRECISO DE INFORMACIÓN SOLICITO INFORMACIÓN DEL REGISTRO DE CAUDALES (REGISTRO DIARIO PROMEDIO MENSUAL, GRÁFICOS, ETC) DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL KM 105 DEL TRAMO OLLANTAYTAMBO-MACHUPICCHU DE LA PROVINCIA DE URUBAMBA, DESDE EL AÑO 1998-ACTUALIDAD							
FORMA O MEDIO DE ENTREGA							
5. FORMA O MEDIO PARA LA ENTREGA DE INFORMACIÓN (SI NO SE INDICA, SE ENTREGA A TRAVÉS DE COPIAS SIMPLÉS, REGULADAS EN EL DECRETO SUPLENTO N° 164-2020-PCM, QUE APRUEBA EL PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO ESTANDARIZADO DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA)							
COPIA SIMPLE	CD	CORREO ELECTRÓNICO	183868@unsaac.edu.pe	APLICACIONES MÓVILES DE MENSAJERÍA INSTANTÁNEA		OTRO	
III. REQUISITOS OPCIONALES DE LA SOLICITUD							
6. DEPENDENCIA QUE POSEE LA INFORMACIÓN (O CUALQUIER OTRO DATO QUE PROPICIE SU LOCALIZACIÓN O FACILITE SU BUSQUEDA) ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL KM 105							
7. TELÉFONO DE EL/LA SOLICITANTE 957332696							
8. CORREO ELECTRÓNICO 183868@unsaac.edu.pe							
9. SEXO FEMENINO							
10. EDAD 27							
11. AUTOIDENTIFICACIÓN ÉTNICA MESTIZA							
12. DISCAPACIDAD NO							
13. LENGUA MATERNA CASTELLANO							
14. ÁREA GEOGRÁFICA DE PROCEDENCIA CUSCO - CUSCO							
IV. MODALIDAD DE NOTIFICACIÓN (marcar modalidad elegida para notificación)							
A) POR CORREO ELECTRÓNICO (no olvidar consignar su correo)	X	B) APLICACIONES MÓVILES DE MENSAJERÍA INSTANTÁNEA (no olvidar consignar su teléfono)		C) A DOMICILIO (no olvidar consignar el domicilio)		D) OTRO	
				(indicar el medio de notificación)			
						FECHA 03 DE JULIO DEL 2024	
FIRMA O HUELLA DIGITAL DE NO SABER FIRMAR O ESTAR IMPECIDO							
OBSERVACIONES:							

Fuente. Tomado de EGEMSA.

Anexo 3. Mesa de partes

1 de 2

Mesa de partes

Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.

Respuesta 1342 de 1344
Código: 8yxh11wd9

Fecha de envío: 03 jul 2024 11:54

Información del solicitante

- Persona natural o jurídica: Persona natural
 - Tipo de documento de identidad - Número de documento de identidad:
DNI - 76847633
 - Nombres: TANIA
 - Apellido paterno: TTITO
 - Apellido materno: PARDO
 - Dirección actual:
Departamento: Cusco
Provincia: Cusco
Distrito: Wanchaq
 - Escribe la dirección: AV HUAYRUOPATA n°901
- Correo electrónico de contacto: 183868@unsaac.edu.pe
- Teléfono o celular de contacto: 957332696

Descripción de la solicitud o trámite

- Asunto de la solicitud o trámite: INFORMACIÓN HIDROMETRICA DE CAUDALES HISTORICOS EN LA ESTACION DEL KM 105
- Descripción de la solicitud o trámite: SOLICITO LA INFORMACION DE CAUDALES REGISTRADOS EN LA ESTACION HIDROMETRICA DEL KM 105 DEL TRAMO OLLANTAYTAMBO-MACHUPICCHU DE LA PROVINCIA DE URUBAMBA, DESDE EL AÑO 1958-ACTUALIDAD, (CAUDALES DIARIOS, MENSUALES, ANUALES Y LOS HISTOGRAMAS, CURVAS IDF, HIDROGRAMAS, ETC.) PARA LA REALIZACIÓN DE UNA TESIS DE INVESTIGACIÓN DE PRE-GRADO

Documentos de sustento (opcional)

- Adjunta los documentos que sustenten tu solicitud [SOLICITUD EGEMSA-TANIA TTITO PARDO.pdf](#)
- Si tus archivos pesan más de 10 MB, puedes dejarnos un link de descarga:

El usuario acepta la política de privacidad y declara bajo juramento que los datos ingresados en este formulario son
Este documento ha sido generado para el uso interno de Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A., por lo que no debe utilizarse para otro fin que no esté relacionado al formulario de Mesa de partes.

 **gob.pe** | Facilita Perú

Fuente. Tomado de EGEMSA.

Anexo 4. Cargo de expediente de entrega de información.

	FECHA Y HORA IMPRESIÓN: 03/07/2024 - 03:47 P. M.
CARGO DE DOCUMENTOS INGRESADOS	
EXPEDIENTE: 20241211002459	
FECHA Y HORA DE INGRESO: 03/07/2024 03:47:09 P. M.	
REMITENTE: TTITO PARDO, TANIA	
DIRECCIÓN: PROLONG. AV. MANCO CCAPAC HUAYRUOPATA 901 - WANCHAQ - CUSCO - CUSCO	
RUC/DNI/OTRO: 76847633	
TIPO DE DOCUMENTO: CORREO ELECTRÓNICO	
NÚMERO DE DOCUMENTO: S/N - 01 FOLIO - REG. 1266 - MPD.	
ASUNTO: ACCESO A LA INFORMACION: SOLICITO INFORMACIÓN DEL REGISTRO D...	

Fuente. Tomado de EGEMSA.

Anexo 5. Solicitud de información de registro de caudales.



Firmado Digitalmente por:
COVARRUBIAS CHOCAÑO Luis Federico FAU
20218339167 hard
Razón: SOY AUTOR DEL DOCUMENTO
Ubicación: EGEMSA
Fecha: 05/07/2024 15:55:49

"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

Cusco, 05 de julio de 2024

GI-R-0055-2024 Expediente: 20241211002459

Señor(a)
TITO PARDO, TANIA
PROLONG. AV. MINCO CCAPAC HUAYRUOPATA 901
Wanchaq - Cusco
Cusco

Asunto : SOLICITO INFORMACIÓN DEL REGISTRO DE CAUDALES (REGISTRO DIARIO PROMEDIO MENSUAL, GRÁFICOS, ETC) DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL KM 105 DEL TRAMO OLLANTAYTAMBO-MACHUPICCHU DE LA PROVINCIA DE URUBAMBA, DESDE EL AÑO 1958-ACTUALIDAD

Referencia : a) S/N - 01 FOLIO - REG. 1266 - MPD

De mi consideración:

Mediante la presente me dirijo a usted, en atención a su documento en referencia, y en el marco del TUO de la ley nro. 27806 Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública y su Reglamento para dar respuesta con el siguiente detalle:

Solicito información del registro de caudales (registro diario promedio mensual, gráficos, etc) de la estación hidrométrica del km 105 del tramo Ollantaytambo-Machupicchu de la provincia de Urubamba, desde el año 1958-actualidad.

Adjunto al presente, el archivo fuente Excel del registro de los caudales de la estación hidrométrica del km 105 de la Central Hidroeléctrica Machupicchu, para los fines consiguientes.

Sin otro en particular, aprovecho la oportunidad para expresarle mis consideraciones personales.

Atentamente,

LUIS FEDERICO COVARRUBIAS CHOCAÑO
RESPONSABLE DE ACCESO A LA INFORMACIÓN
PÚBLICA DE EGEMSA.

LUIS FEDERICO COVARRUBIAS CHOCAÑO
PROFESIONAL DE IMAGEN Y RESPONSABILIDAD SOCIAL



Según lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Puede validar la autenticidad e integridad del documento generado a través del código QR ubicado en la parte inferior izquierda del presente documento o colocando la siguiente dirección en la barra del navegador: <http://siged.egemsa.com.pe/SistemaCastilla/verificacion> e ingresando la siguiente clave BURBYS. 1 de 1

Para un próximo trámite, señalar el número de expediente: 20241211002459

Fuente. Tomado de EGEMSA.

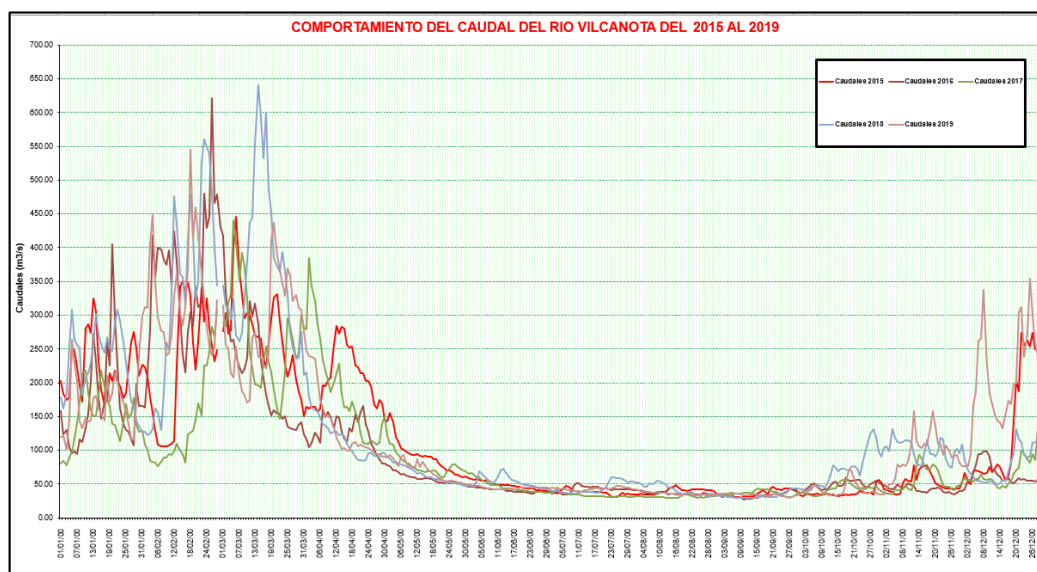
Anexo 6. Información de caudales históricos 1981-2024

	CAUDALES HISTORICOS PROMEDIO DIARIOS (m3/s)																							
	RIO VILCANOTA ESTACION KM-105																							
Fecha / Año	1958	1959	1960	1961	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
01 – Enero	318.00	131.00	283.00	154.00	120.06	82.99	341.50	116.00	117.00	75.25	85.63	414.00	141.00	84.25	183.00	87.25	267.75	91.75	162.00	261.50	282.75	112.00	340.50	123.50
02 – Enero	318.00	138.50	349.73	187.23	120.06	89.99	414.00	110.00	148.00	81.25	138.47	357.75	133.00	105.25	185.00	81.25	436.50	98.00	166.00	240.00	250.50	187.50	391.50	125.75
03 – Enero	306.00	126.00	411.50	234.11	125.04	95.99	359.00	104.26	168.00	89.39	174.28	302.75	143.00	141.37	178.00	69.25	366.50	104.00	196.25	186.00	217.50	189.50	465.50	129.50
04 – Enero	252.00	112.00	379.16	241.67	116.43	102.00	344.00	100.67	162.00	93.26	183.00	242.75	191.00	157.00	237.75	56.50	351.50	199.50	201.50	161.00	244.25	204.50	425.50	130.50
05 – Enero	238.00	106.50	373.60	271.58	132.09	115.24	417.50	101.34	145.00	118.44	191.54	209.00	249.00	179.67	234.00	54.00	360.25	161.00	199.00	198.25	206.50	298.00	649.25	119.50
06 – Enero	224.00	102.00	359.95	301.50	168.38	108.26	291.15	106.07	130.00	133.06	284.00	184.00	295.25	227.50	210.25	52.50	384.00	146.00	239.00	215.25	190.50	256.75	599.25	139.75
07 – Enero	192.00	112.50	405.26	331.70	203.30	95.21	250.50	120.56	122.00	128.18	242.55	162.00	309.22	205.24	189.25	48.50	365.25	128.00	286.50	250.25	178.50	253.00	483.00	181.50
08 – Enero	237.00	127.00	407.85	226.00	360.06	83.11	204.00	125.32	112.00	117.57	227.75	145.00	263.46	194.44	190.25	55.50	344.00	114.00	229.00	205.25	146.50	238.00	463.00	216.75
09 – Enero	237.00	129.00	303.61	288.79	288.50	82.12	190.00	110.24	120.00	102.00	242.50	147.00	294.55	204.74	221.50	108.00	321.50	117.00	190.00	222.75	124.75	270.50	406.75	333.00
10 – Enero	231.00	129.00	362.13	240.56	273.38	79.63	174.41	110.03	119.35	197.25	228.72	163.25	355.52	193.87	277.50	90.25	287.75	121.00	241.50	244.00	127.50	224.00	314.25	229.75
11 – Enero	219.67	119.00	350.64	234.27	221.72	77.14	160.75	172.52	103.77	342.75	333.20	139.15	279.47	242.65	269.00	79.75	307.75	119.00	247.75	256.50	126.50	218.50	350.50	233.00
12 – Enero	208.33	161.00	312.18	196.72	237.50	74.06	153.83	164.30	136.53	359.00	316.50	169.79	285.25	290.00	243.10	139.00	301.50	154.00	237.75	389.00	126.50	235.50	379.25	219.50
13 – Enero	197.00	162.50	275.80	183.32	199.04	63.44	138.80	156.34	159.09	332.75	307.75	181.29	280.25	324.80	244.50	142.00	259.00	132.00	302.75	350.25	111.25	239.25	390.50	198.50
14 – Enero	199.00	147.50	348.02	159.13	196.89	59.86	136.00	134.14	153.19	279.00	300.48	210.25	224.00	341.50	286.45	138.00	229.00	141.00	277.75	314.00	109.00	254.25	513.00	193.50
15 – Enero	255.00	135.50	411.14	153.55	188.90	64.16	121.61	136.90	175.03	307.75	240.25	199.00	207.50	341.75	331.60	162.00	261.50	137.00	266.50	376.50	125.00	249.00	506.75	182.50
16 – Enero	384.50	135.00	335.06	135.50	162.66	71.19	106.00	120.52	184.98	280.25	240.25	181.43	185.00	385.25	291.90	177.00	247.75	189.00	374.00	432.75	129.03	360.50	500.50	175.50
17 – Enero	514.00	142.50	307.94	130.65	156.71	99.51	95.67	113.15	176.60	265.47	210.25	160.00	227.57	431.72	277.75	182.94	262.75	187.00	384.00	506.50	131.50	441.50	469.25	205.50
18 – Enero	596.00	110.00	352.13	121.80	140.99	127.83	88.95	102.23	181.93	255.06	180.00	146.39	264.87	400.25	245.25	168.00	321.50	162.00	451.50	402.75	170.50	363.00	435.50	240.50

1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
113.50	120.25	85.00	140.50	122.35	85.00	307.00	223.50	145.25	197.75	301.00	123.74	208.31	281.25	191.61	166.16	240.81	202.13	202.13	157.61	90.73	178.45	119.52	257.39	191.29	120.50	62.59	193.71	
106.00	126.50	94.00	153.50	118.26	94.00	225.50	240.25	63.00	179.00	219.00	173.79	294.17	251.59	179.18	83.46	263.68	199.28	183.32	123.74	84.62	161.96	121.15	351.86	161.39	106.85	63.95	124.32	
94.75	135.50	103.75	161.50	123.46	103.75	211.75	276.50	220.75	202.00	281.00	142.70	281.71	221.44	153.87	285.16	255.47	214.95	175.08	129.81	78.37	194.30	100.38	419.67	201.46	106.37	67.81	135.90	
130.50	138.50	88.00	116.50	134.48	88.00	223.25	235.50	241.25	207.25	283.00	157.64	325.97	243.99	136.10	335.85	223.83	284.30	178.64	134.90	89.45	253.85	146.93	460.68	223.69	95.83	68.73	159.91	
133.75	157.50	113.50	131.50	150.25	113.50	217.25	271.00	165.50	233.25	259.50	239.99	304.68	262.92	129.53	295.30	243.37	258.16	253.16	96.03	97.49	308.23	263.23	632.90	1247.12	92.23	76.18	176.02	
106.75	201.50	112.75	137.50	197.50	112.75	182.00	264.25	162.00	252.75	222.25	217.80	222.54	234.78	118.96	252.12	303.25	325.96	247.08	98.90	117.16	264.15	223.19	730.67	236.96	93.19	73.20	225.14	
116.50	226.75	120.25	155.50	293.00	120.25	167.25	259.25	129.00	208.25	244.00	261.92	188.06	208.35	103.23	226.56	270.35	338.39	223.60	94.65	140.02	256.14	203.25	493.21	303.60	93.99	67.76	192.90	
99.25	312.17	208.50	133.50	293.00	208.50	163.50	251.00	110.50	189.00	273.00	270.02	193.59	186.22	112.35	238.82	293.14	396.00	196.34	116.34	171.17	252.76	142.39	404.47	299.77	96.03	62.84	144.83	
91.75	243.00	240.50	180.50	328.00	240.50	200.25	251.75	134.00	149.25	258.25	238.11	175.22	208.72	112.38	256.80	255.47	350.70	172.23	112.46	214.16	191.36	132.99	288.64	213.82	114.63	62.45	188.99	
94.75	220.50	248.00	153.50	460.50	248.00	213.00	278.75	154.00	157.00	247.25	187.83	175.20	210.58	109.26	273.46	209.93	334.13	280.08	132.13	218.16	208.42	149.34	265.53	204.20	146.38	60.31	104.63	
103.75	179.50	375.50	201.50	418.00	354.25	229.75	287.75	142.50	153.25	265.00	396.79	195.21	347.67	160.17	227.83	200.23	345.90	286.60	153.99	186.36	213.84	142.94	234.84	195.48	212.69	60.59	103.36	
125.25	167.50	326.75	222.00	398.00	326.75	239.50	319.50	133.75	152.25	323.50	377.03	191.25	408.96	167.25	162.46	196.41	283.38	273.43	203.10	199.49	229.32	143.62	248.89	179.31	294.21	59.06	87.07	
174.50	167.50	253.00	244.50	341.75	253.00	306.50	414.25	129.75	194.75	332.75	326.95	165.27	337.49	213.71	157.14	285.94	245.95	324.92	273.29	150.03	257.24	177.16	214.90	169.45	252.19	52.83	78.47	
185.50	183.50	218.83	167.50	529.25	219.75	291.00	440.50	180.50	312.75	322.50	362.08	143.62	393.50	234.04	165.05	256.39	221.61	305.40	232.52	150.33	301.33	181.29	209.50	218.95	218.15	50.03	90.01	
162.50	145.50	202.83	195.50	463.00	202.50	257.50	373.75	178.25	442.25	274.00	310.96	132.13	388.33	219.60	154.57	239.79	250.17	231.72	176.72	181.45	271.01	161.54	285.29	251.64	197.08	45.75	87.24	
166.50	125.50	203.50	330.50	410.50	203.50	311.75	415.50	181.75	420.00	299.25	195.43	116.33	356.16	187.40	143.32	251.17	213.70	189.82	146.37	218.16	257.24	154.72	199.79	288.64	213.82	114.63	62.45	188.99
226.25	120.25	176.17	336.75	485.33	175.50	309.00	435.00	174.00	403.50	321.75	174.22	133.90	337.67	199.94	131.58	252.41	247.83	166.90	171.17	194.03	244.82	144.58	266.40	372.08	173.28	39.99	100.20	
356.75	112.00	55.50	323.00	488.00	105.50	276.50	479.75	202.25	491.00	273.00	144.58	132.97	338.82	133.94	126.65	294.38	265.97	174.15	260.76	176.16	257.68	210.66	220.41	404.13	275.93	44.13	16.20	
394.25	113.50	146.50	309.00	518.00	146.50	298.75	483.50	200.25	613.00	229.75	132.98	153.11	329.39	127.29	133.38	322.22	355.09	214.68	225.86	165.27	253.90	171.82	197.80	366.55	223.77	43.06	119.74	
391.75	116.75	130.50	269.25	525.10	130.50	343.50	379.75	203.75	547.75	207.25	137.35	239.33	320.67	125.29	169.77	293.09	534.17	202.17	405.54	139.18	247.06	184.48	362.76	241.19	439.63	112.57		
380.50	113.70	127.67	214.50	471.75	130.50	401.00	425.00	161.50	401.00	202.00	151.01	285.39	337.78	127.19	150.10	282.26	408.63	217.78	301.20	137.51	268.03	241.91	218.62	372.62	326.92	47.71	104.50	
529.67	119.50	137.50	180.50	420.50	116.75	589.00	408.00	159.00	372.75	199.75	173.19	270.99	474.80	178.51	225.24	373.67	341.63	215.16	227.07	126.13	308.51	201.25	276.09	485.49	466.15	45.20	103.07	
485.50	143.50	114.50	255.75	395.50	114.50	534.50	525.25	120.25	338.75	266.25	176.26	264.14	550.08	127.80	140.80	345.90	354.26	194.44	161.39	131.13	201.14	185.30	327.00	381.43	568.40	41.08	100.00	

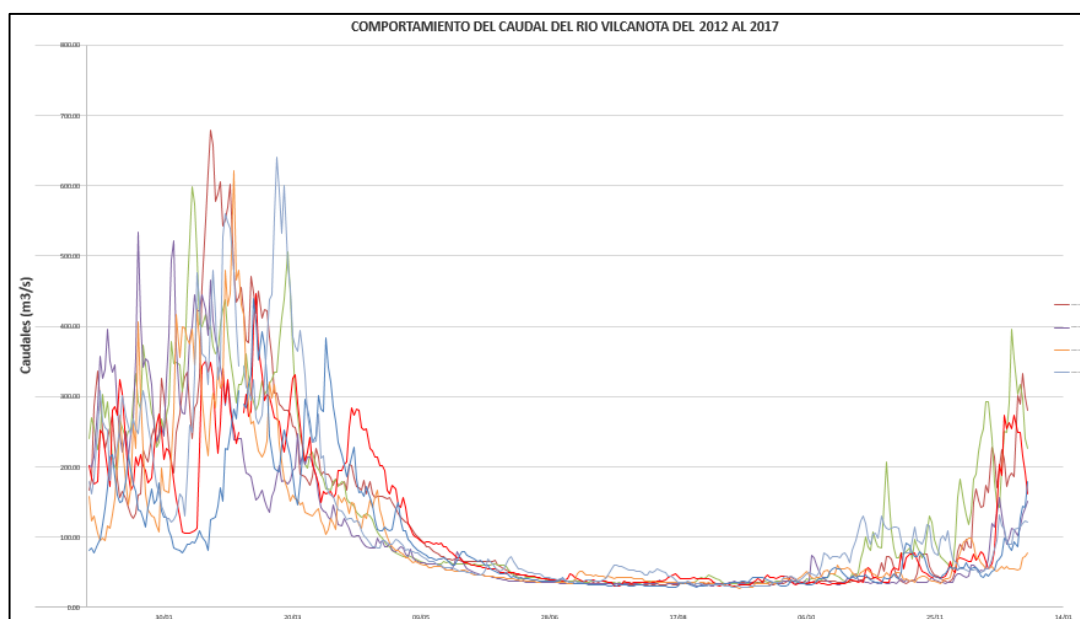
Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 7. Comportamiento del caudal del río Vilcanota del 2015-2019



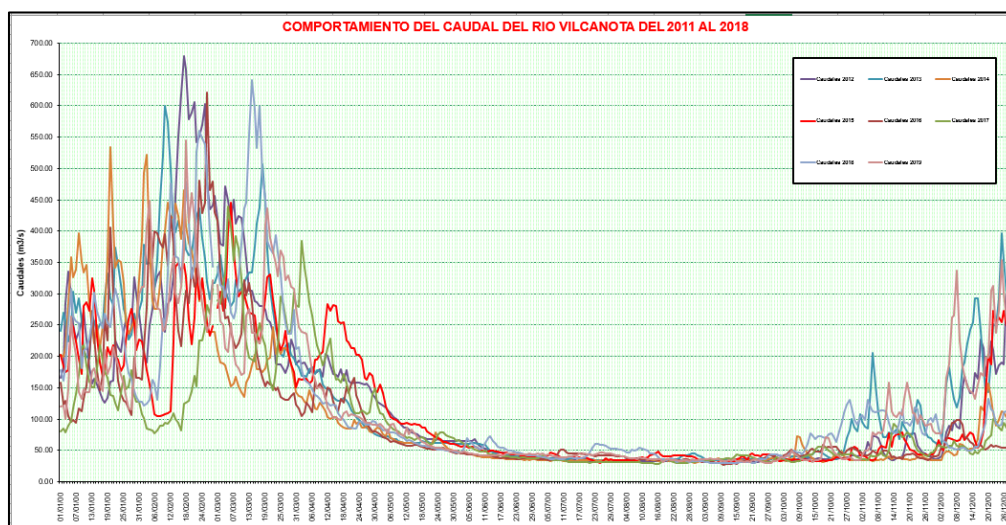
Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 8. Comportamiento del caudal del río Vilcanota del 2012 al 2017



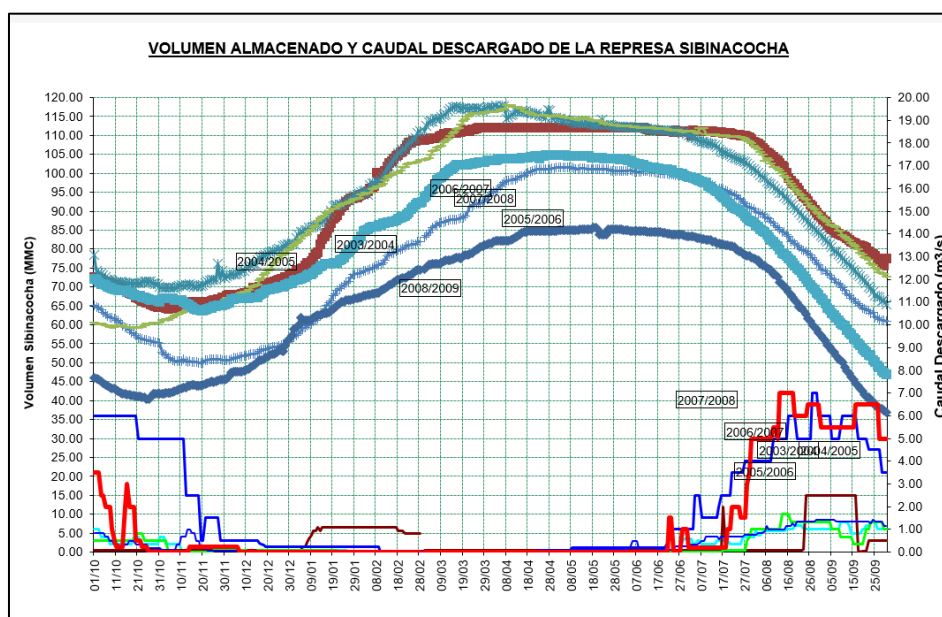
Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 9. Comportamiento del caudal del rio Vilcanota del 2011 al 2018



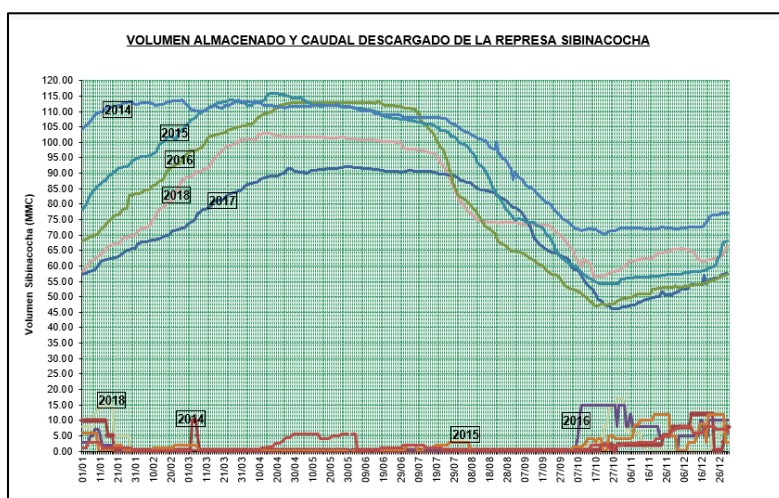
Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 10. Volumen almacenado y caudal descargado de la represa de Sibinacocha del 2004-2009



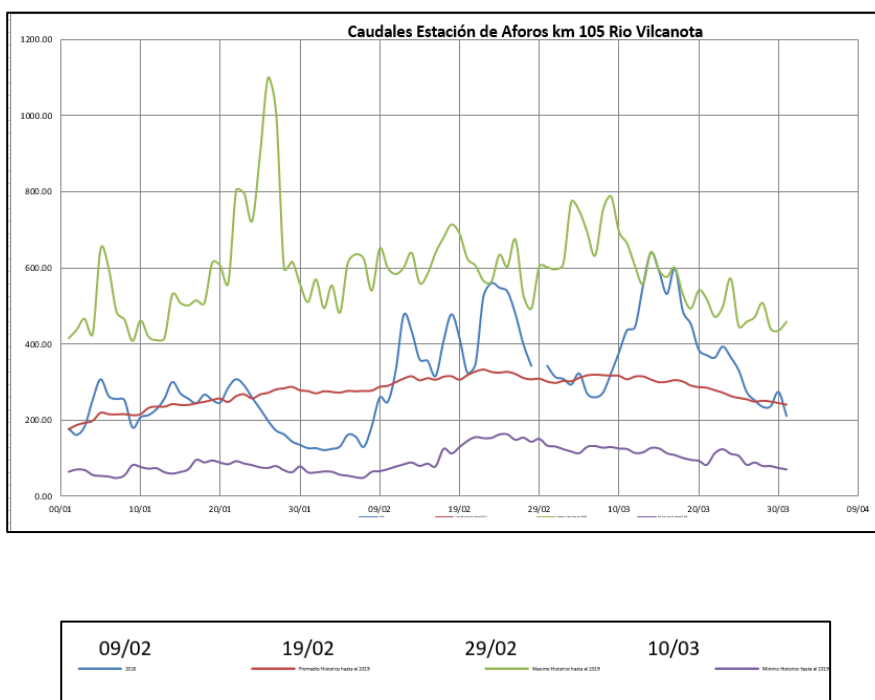
Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 11. Volumen almacenado y caudal descargado de la represa de Sibinacocha del 2014-2018



Fuente. Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.

Anexo 12. Caudales estación de aforos km 105 del rio Vilcanota



Fuente. *Tomado de la información proporcionada por EGEMSA.*

C. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

C.1. Ancho promedio (A_p)

Es la relación entre el área y la longitud axial

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

Donde:

- A = Área
- La = Longitud axial

$$A_p = 42.2 \text{ km}$$

C.2. Factor de forma (Ff)

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

Donde:

- A = Área
- La = Longitud axial

$$Ff = 0.19$$

Tabla 70.

Clases de forma según rango de valores de Ff

Ff	Clases de forma
<0.22	Muy alargada
0.22-0.30	Alargada
0.30-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.60	Ligeramente ensanchada
0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada

Fuente. Tomado de (Pérez, 1979), como se citó en (Navarro, 2021)

C.3. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelious (K)

$$K = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- P = Perímetro
- A = Área de la cuenca

$$K = 3.10$$

C.4. Curva hipsométrica

Para el cálculo de la curva hipsométrica se dividió la cuenca en franjas de 250 metros, y están detallados en la tabla N° 55.

Tabla 71.*Cálculo de la curva hipsométrica*

Cota más baja	Cota más alta	Área Parcial (km2) Si	Áreas Acumuladas	Áreas que se quedan sobre las altitudes	% del total	% Total que queda sobre la altitud
2145	2250	9.20	9.20	9583.80	0.10%	99.904%
2250	2500	19.65	28.85	9564.16	0.20%	99.699%
2500	2750	131.80	160.65	9432.36	1.37%	98.325%
2750	3000	276.89	437.54	9155.47	2.89%	95.439%
3000	3250	651.52	1089.06	8503.95	6.79%	88.647%
3250	3500	1076.87	2165.93	7427.08	11.23%	77.422%
3500	3750	1314.96	3480.89	6112.12	13.71%	63.714%
3750	4000	1548.69	5029.57	4563.44	16.14%	47.570%
4000	4250	1454.34	6483.91	3109.10	15.16%	32.410%
4250	4500	1328.07	7811.98	1781.02	13.84%	18.566%
4500	4750	1262.85	9074.83	518.17	13.16%	5.402%
4750	5000	403.19	9478.02	114.99	4.20%	1.199%
5000	5250	93.00	9571.02	21.99	0.97%	0.229%
5250	5500	19.56	9590.57	2.43	0.20%	0.025%
5500	5750	1.99	9592.56	0.44	0.02%	0.005%
5750	6000	0.39	9592.95	0.06	0.00%	0.001%
6000	6323	0.06	9593.01	0.00	0.00%	0.000%
Suma		9593.01			100.00%	

C.5. Altitud media de la cuenca (Hm)

Tabla 72.*Cálculo de la altitud media de la cuenca*

Cota más baja	Cota más alta	Área Parcial (km2) Si	Altitud media de cada área parcial Hi	Si*Hi
----------------------	----------------------	------------------------------	--	--------------

2145	2250	9.20	2197.5	20222.59
2250	2500	19.65	2375	46665.76
2500	2750	131.80	2625	345971.56
2750	3000	276.89	2875	796056.12
3000	3250	651.52	3125	2036001.52
3250	3500	1076.87	3375	3634432.08
3500	3750	1314.96	3625	4766720.94
3750	4000	1548.69	3875	6001156.56
4000	4250	1454.34	4125	5999146.77
4250	4500	1328.07	4375	5810321.77
4500	4750	1262.85	4625	5840683.41
4750	5000	403.19	4875	1965538.78
5000	5250	93.00	5125	476615.55
5250	5500	19.56	5375	105109.46
5500	5750	1.99	5625	11179.14
5750	6000	0.39	5875	2262.90
6000	6323	0.06	6161.5	364.16
Suma		9593.01		37858449.05

La altitud media se calcula con la fórmula:

$$Hm = \frac{\sum Si * Hi}{\sum Si}$$

$$Hm = 3946.46 \text{ msnm}$$

La altitud media de la cuenca de estudio es de 3946.46 msnm.

C.6. Grado de ramificación

Tabla 73.

Ordenes de ríos

Orden	Cantidad de corrientes	Longitud (km)
1°	2852	3685.39
2°	1312	1689.28
3°	721	808.16

4°	375	398.35
5°	128	139.1
6°	100	115.0
Total	5488	6835.28

La cuenca de estudio presenta un grado de ramificación de 6 según la clasificación de Strahler.

C.7. Densidad de drenaje (Dd)

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

$$Dd = 0.71$$

Donde:

- Li = longitud total de corrientes
- A = área de la cuenca

C.8. Densidad de corrientes (Dc)

$$Dc = \frac{Ns}{A}$$

$$Dc = 0.57$$

Donde:

- Ns = número de corrientes perennes o intermitentes

- A = área de la cuenca

C.9. Extensión media de escurrimiento (E_s)

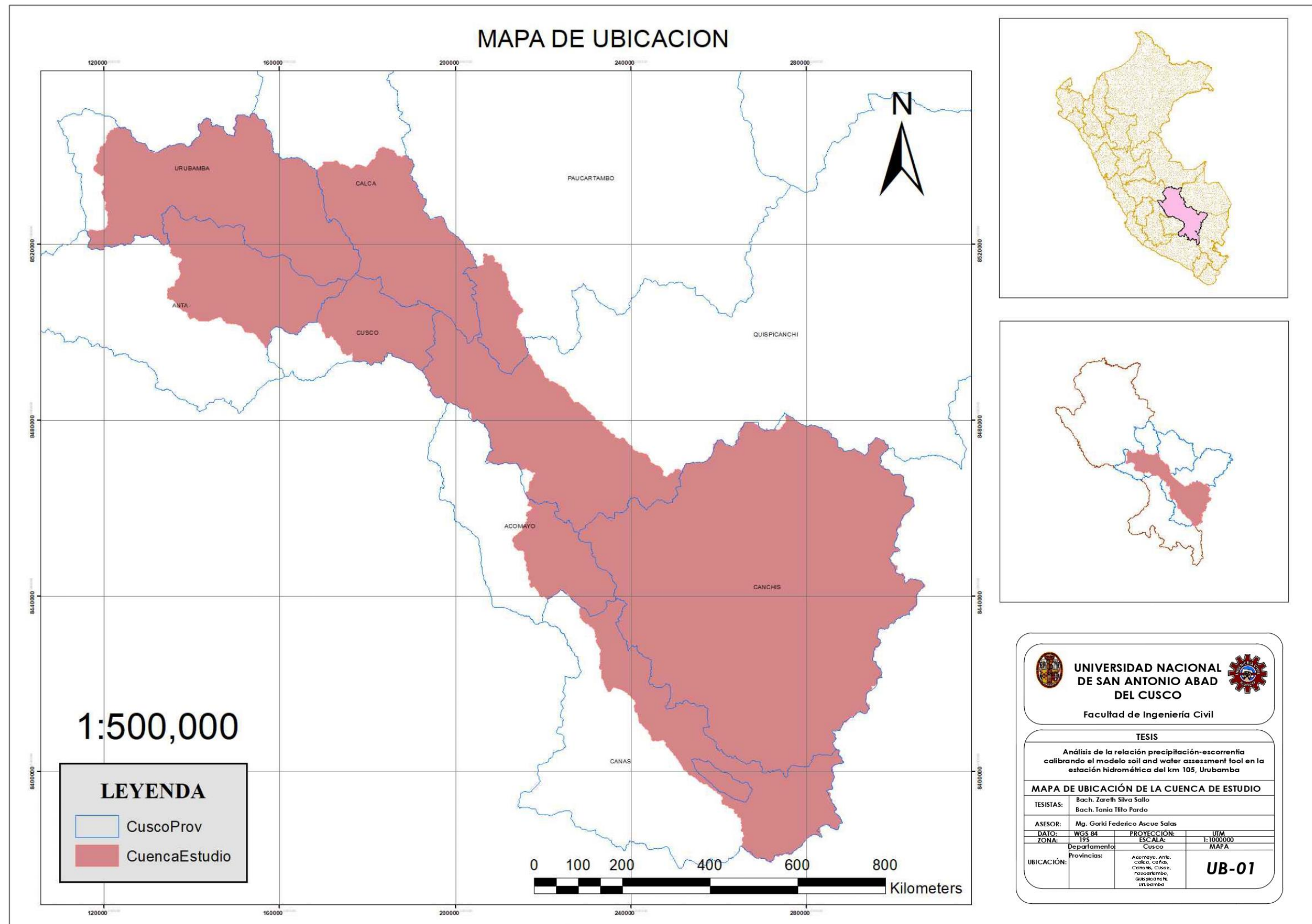
$$E_s = \frac{A}{4 * Li}$$

$$E_s = 0.35 \text{ km}$$

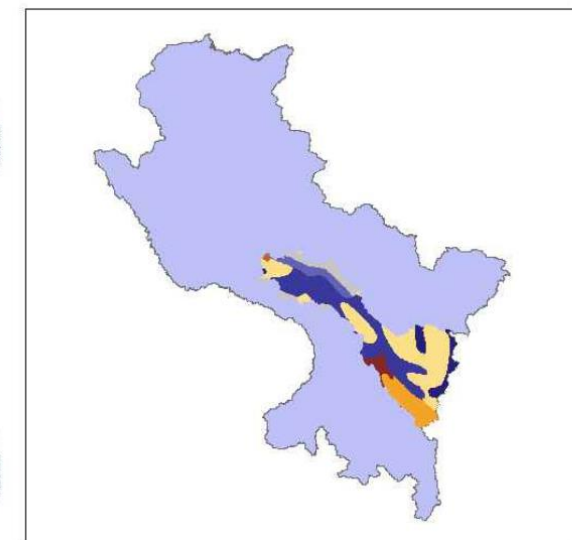
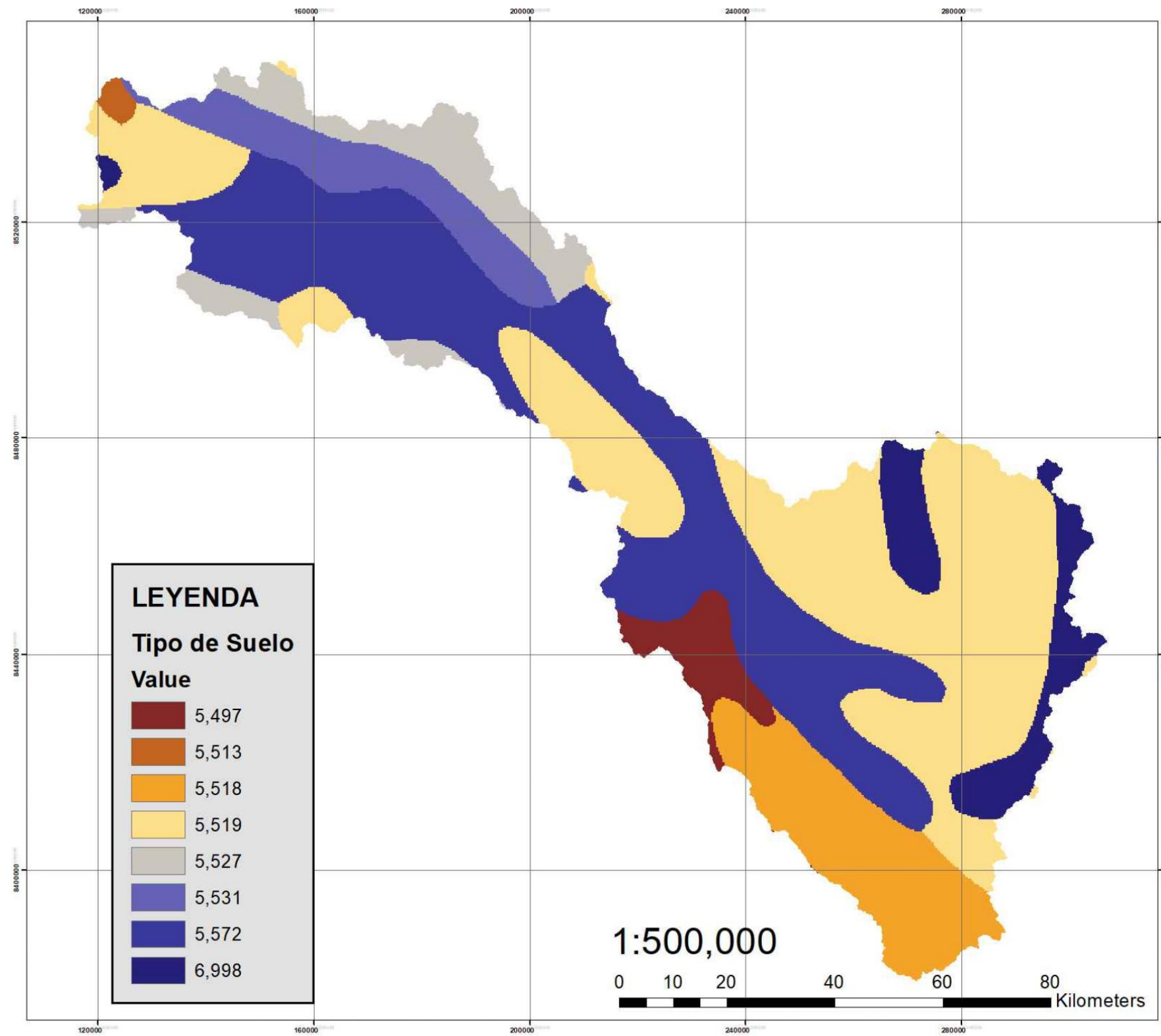
Donde:

- A = Área de la cuenca
- Li = Longitud total de los cursos de agua

PLANOS DE MAPAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO



MAPA DE TIPO DE SUELO



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



Facultad de Ingeniería Civil

TESIS

Análisis de la relación precipitación-escurrimiento
calibrando el modelo soil and water assessment
tool en la estación hidrométrica del km 105,
Urubamba

MAPA DE TIPO DE SUELO

TESISTAS:	Bach. Zareth Silva Sallo		
	Bach. Tania Tito Pardo		
ASESOR:	Mg. Gorki Federico Ascue Salas		
DATE:	WGS 84	PROYECCIÓN:	UTM
ZONA:	19S	ESCALA:	1:1000000
UBICACIÓN:	Departamento:	Cusco	MAPA
	Provincias:	Acemayo, Anta, Calca, Cacha, Cancha, Cusco, Furcata, Huancabamba, Urubamba	PL-01

