



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



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS HIDROLÓGICOS
PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA BAJO DIFERENTES
ESQUEMAS DE DISCRETIZACIÓN APLICADOS A LA CUENCA
DEL RÍO COATA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. YURY MARIO SARMIENTO HUANACUNI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS
HIDROLÓGICOS PRECIPITACIÓN Y ESCO
RRENTÍA BAJO DIFERENTES ESQUEMAS
DE DISCRETIZACIÓN APLICADOS A LA
CUENCA DEL RÍO COATA**

AUTOR

YURY MARIO SARMIENTO HUANACUNI

RECuento DE PALABRAS

20602 Words

RECuento DE CARACTERES

118237 Characters

RECuento DE PÁGINAS

103 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.7MB

FECHA DE ENTREGA

Jan 25, 2024 7:34 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jan 25, 2024 7:36 PM GMT-5

● 11% de similitud general

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

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)



WILBER FERMIN LAQUI VILCA
INGENIERO AGRICOLA
REG. CIP. 88683

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo y sacrificio inquebrantable en cada etapa de mi formación académica.

A mis profesores, por guiarme con sabiduría y paciencia, sembrando en mí el conocimiento y la pasión por las Ciencias Agrícolas, fuente de vida y desarrollo.

A mis compañeros de estudios, por compartir risas, retos y aprendizajes, siendo parte fundamental de este camino que hoy culmina.

A la Universidad Nacional del Altiplano, por brindarme las herramientas y oportunidades para crecer como profesional y como persona, honrando la riqueza de nuestra tierra y cultura.

Este logro no es solo mío, sino de cada mano que ha sostenido la mía, de cada palabra de aliento y de cada enseñanza. ¡Gracias por ser parte de este sueño convertido en Ing. Agrícola!"

Yury Mario Sarmiento Huanacuni



AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de tesis:

A los miembros del jurado por su orientación, sabiduría y constante apoyo a lo largo de este proceso. Sus consejos y dedicación fueron fundamentales en cada etapa de este trabajo. Agradezco sinceramente a mis docentes por compartir su conocimiento y guiar mis pasos en el mundo de la agricultura. Sus enseñanzas han sido una fuente invaluable de inspiración.

Agradezco profundamente al M.Sc. Wilber Fermín Laqui Vilca por su apoyo incondicional. A mis padres y familia, cuyo amor, aliento y sacrificio incondicional han sido el motor que impulsó cada uno de mis logros. A ustedes les debo todo lo que soy.

A mis amigos y compañeros de carrera, por su apoyo, motivación y momentos compartidos. Sus ánimos fueron una luz en los momentos más desafiantes.

Por último, a la Universidad Nacional del Altiplano en Puno, por brindarme el espacio y las herramientas para desarrollarme como profesional y por ser el pilar fundamental en mi formación académica.

Gracias a todos los que formaron parte de este camino, por su inestimable contribución y por ser parte de este logro.

Yury Mario Sarmiento Huanacuni



ÍNDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1.1. Pregunta general.....	18
1.1.2. Preguntas específicas.....	18
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.2.1. Objetivo general	19
1.2.2. Objetivos específicos.....	19
1.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	19
1.3.1. Hipótesis del investigador	19
1.3.2. Hipótesis nula.....	20
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LA LITERATURA	
2.1. MARCO TEÓRICO	21
2.1.1. Ciclo Hidrológico.....	21



2.1.2.	Fase terrestre del ciclo hidrológico	22
2.2.	LA PRECIPITACIÓN.....	23
2.2.1.	Naturaleza de la precipitación	23
2.2.2.	Formas de precipitación	24
2.3.	LA ESCORRENTÍA	29
2.3.1.	Naturaleza de la Escorrentía.....	29
2.3.2.	Factores que influyen en la capacidad de infiltración	29
2.3.3.	Procesos que influyen en la escorrentía	30
2.3.4.	Impacto de la Escorrentía en la Agricultura.....	30
2.3.5.	Gestión y Mitigación de la Escorrentía	31
2.3.6.	Tipos de escorrentía:	31
2.4.	LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	33
2.4.1.	Proceso de evapotranspiración	33
2.4.2.	Factores que Influyen	33
2.4.3.	Métodos de medición y estimación	34
2.5.	MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA	34
2.6.	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	35
2.6.1.	Modelo Hidrológico Swat (Soil And Water Assessment Tool).....	36
2.6.2.	Funciones del modelo hidrológico swat.....	37
2.7.	ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)	39
2.8.	OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS	40
2.8.1.	El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System).....	40
2.8.2.	Modelo Hidrológico HEC-HMS Aplicaciones del HEC-HMS:	41



2.8.3. WRF-hydro (Weather Research And Forecasting Hydrological Model) .	44
2.9. DISCRETIZACIÓN	45
2.10. TIPOS DE DISCRETIZACIÓN.....	46
2.10.1. Discretización espacial en cuencas hidrográficas	46
2.10.2. Subdivisión de la Cuenca en elementos discretos.....	47
2.10.3. Resolución espacial y representatividad de la Cuenca.....	47
2.10.4. Discretización temporal en modelos hidrológicos	47
2.10.5. División temporal de datos y procesos hidrológicos	47
2.10.6. Importancia de la resolución temporal en la precisión	48
2.11. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	48
2.11.1. Antecedentes Internacionales.....	48
2.11.2. Antecedentes Nacionales	55
2.11.3. Antecedentes Regionales	60
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	65
3.1.1. Tipo de investigación	65
3.1.2. Diseño del estudio.....	65
3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO	65
3.2.1. Ubicación Geográfica:	66
3.2.2. Ubicación Hidrográfica:.....	66
3.2.3. La distribución de pendientes en hidrología	67
3.2.4. La distribución de pendientes en hidrología	68
3.2.5. Estudio Geológico.....	69
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	70



3.4. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN:	70
3.4.1. Criterios de inclusión:	70
3.4.2. Criterios de exclusión:	70
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	71
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	74
3.7. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	74
3.7.1. Datos espaciales:	76
3.7.2. Datos meteorológicos e hidrológicos:	76
3.7.3. Calibración y validación del modelo SWAT.	77

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS	80
4.2. DISCUSIÓN	85
V. CONCLUSIONES	86
VI. RECOMENDACIONES	87
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS	95

Área: Ingeniería y Tecnología

Temas: Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN : 30 de enero del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables.....	72
Tabla 2 Escenarios de ajuste de parámetros hidrológicos para el modelo de la Cuenca del río Coata.....	77
Tabla 3 Calibración y validación del modelo SWAT	78
Tabla 5 Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado.....	79
Tabla 6 Análisis descriptivo del modelo hidrológico SWAT precipitación y escurrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata.....	80
Tabla 7 Describir el balance anual de agua de precipitación, evapotranspiración y escurrentía en la Cuenca del río Coata 2000 – 2020.....	81
Tabla 8 Describir y analizar la precipitación promedio en diferentes escalas temporales en la Cuenca del río Coata 2000-2020	82
Tabla 9 Descripción de precipitación, y disponibilidad hídrica en la Cuenca del río Coata 2000-2020.....	83
Tabla 10 Descripción de las proyecciones hidrológicas precipitación ,escurrentía y caudal de la Cuenca del río Coata 2020-2040.....	84



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Representación gráfica de discretización de la Cuenca del río Coata.....	17
Figura 2 Ciclo Hidrológico.....	21
Figura 4 Tipos de Formación de Escorrentía Superficial.....	31
Figura 5 Los modelos hidrológicos conceptos de parametrización diferentes.....	35
Figura 6 Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados	36
Figura 7 Representación de los movimientos del agua en SWAT	38
Figura 8 Ubicación Hidrográfica de la Cuenca del Río Coata	67
Figura 9 Distribución espacial de pendientes – Cuenca del río Coata	68



ACRÓNIMOS

UNAP	: Universidad Nacional del Altiplano Puno
Mm	: Milímetros (unidad de medida para la precipitación, escorrentía, entre otros).
m³/s	: Metros cúbicos por segundo (unidad de medida para el caudal).
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool.(Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua).
ALOS PALSAR	: (Satélite Avanzado de Observación Terrestre - Radar de Apertura Sintética de Banda L tipo Matriz Faseada).
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial).
MIROC-ESM RCP:	(Modelo para Investigaciones Interdisciplinarias sobre el Clima - Modelo del Sistema Terrestre) RCP (Rutas Representativas de Concentración)
IHACRES	:Identificación de Hidrogramas y Flujos Componentes a partir de Datos de Lluvia, Evaporación y Caudal de Corriente.
MAE	:Error Medio Absoluto.



RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue describir y analizar modelos hidrológicos precipitación y escorrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata. Esta investigación se basó en un enfoque cuantitativo, diseño descriptivo, relacional, no experimental, prospectivo buscó describir la relación de la precipitación y la escorrentía en la Cuenca del río Coata. La muestra incluyó las áreas geográficas dentro de la cuenca que contaban con datos confiables y representativos de precipitación. Para recolectar datos, se utilizó tecnología satelital, específicamente el satélite ALOS PALSAR, (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) y el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). El procedimiento implicó la recopilación de datos climáticos históricos, la delimitación precisa de la Cuenca, la selección y calibración de modelos hidrológicos, los datos se procesaron en Microsoft Excel y la versión 23 del software estadístico SPSS. Para evaluar la correlación entre las variables, se empleó el coeficiente de correlación múltiple como prueba estadística. Los resultados evidenciaron relación entre precipitación y escorrentía en la Cuenca del río Coata entre 2000 y 2020. Años como 2007 y 2016 con 1215 mm y 1340 mm de precipitación generaron escorrentías de 295 mm y 321 mm, respectivamente, mientras en 2017, con 1150 mm, la escorrentía fue de 280 mm, menor que en años similares. Las conclusiones resaltan la importancia de considerar esta relación para la gestión sostenible de recursos hídricos y la necesidad de adaptación ante posibles cambios en el régimen hídrico.

Palabras claves: Caudal, discretización, disponibilidad hídrica, escorrentía, evapotranspiración.



ABSTRACT

The objective of this research was to describe and analyse hydrological rainfall-runoff models under different discretisation schemes applied to the Coata River Basin. This research was based on a quantitative approach that focused on numerical data. Its design was descriptive, relational, non-experimental, prospective, seeking to describe the relationship of rainfall and runoff in the Coata River Basin. The sample included geographical areas within the basin that had reliable and representative rainfall data. Satellite technology was used to collect data, specifically the ALOS PALSAR satellite (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) and the hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The procedure involved the collection of historical climate data, the precise delimitation of the Basin, the selection and calibration of hydrological models, the data were processed in Microsoft Excel and SPSS statistical software version 23. To evaluate the correlation between variables, the multiple correlation coefficient was used as a statistical test. The results showed a relationship between precipitation and runoff in the Coata River Basin between 2000 and 2020. Years such as 2007 and 2016 with 1215 mm and 1340 mm of precipitation generated runoff of 295 mm and 321 mm, respectively, while in 2017, with 1150 mm, runoff was 280 mm, lower than in similar years. This discrepancy suggests the influence of other factors, such as the soil's capacity to retain water, on the amount of runoff generated. The conclusions highlight the importance of considering this relationship for sustainable water resource management and the need to adapt to possible changes in the water regime.

keywords: Flow, discretisation, runoff, evapotranspiration, water availability.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La comprensión de los procesos hidrológicos en una cuenca fluvial es esencial para la gestión sostenible del recurso hídrico. El estudio de la relación entre la precipitación y la escorrentía es fundamental para comprender la dinámica del agua en las Cuencas(Natumanya et al. 2022). Esta conexión es vital para predecir y gestionar riesgos de inundaciones, sequías y la disponibilidad de agua para comunidades y ecosistemas(Natumanya et al. 2022).

Al analizar cómo la lluvia influye en la escorrentía, se puede planificar eficazmente el uso del agua, implementar estrategias de conservación y adaptarse a los cambios climáticos, asegurando así la seguridad hídrica y la sustentabilidad ambiental en las regiones afectadas(Natumanya et al. 2022).

La relación entre la precipitación y la escorrentía tiene efectos profundos en el ciclo hidrológico. Las variaciones en la cantidad, intensidad y distribución de la lluvia impactan directamente en la escorrentía, afectando la disponibilidad de agua para abastecimiento humano, agricultura y ecosistemas(Fereidoon, Koch, and Brocca 2019). Esto puede desencadenar inundaciones catastróficas o sequías severas, alterar la calidad del agua y erosionar suelos. Comprender esta conexión es crucial para pronosticar y mitigar riesgos, planificar el uso sostenible del agua y desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático, asegurando la resiliencia de las comunidades y la salud de los ecosistemas(Fereidoon et al. 2019).

La comprensión de la relación entre la precipitación y la escorrentía en cuencas hidrográficas, juega un papel vital en la gestión hídrica y la mitigación de desastres(Ali et al., 2014).



La precipitación, es crucial en el ciclo hidrológico, representa la entrada de agua en una Cuenca. Su medición histórica permite comprender patrones climáticos, fundamentales para la gestión del agua. Sin embargo, su variabilidad espacial y temporal desafía su precisión. La escorrentía, resultante de la precipitación, indica el flujo de agua en la Cuenca. Es esencial para evaluar riesgos de inundaciones y gestionar recursos hídricos.

Por ello, esta investigación describió y analizó modelos hidrológicos precipitación y escorrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La falta de comprensión de la precipitación y escorrentía resulta en una gestión ineficaz del agua, llevando a una planificación deficiente para enfrentar inundaciones repentinas o sequías prolongadas(Nazeer et al. 2022). Sin estrategias basadas en datos, aumenta el riesgo de desastres naturales no anticipados, pérdida de cosechas, escasez de agua potable y daños en la infraestructura. La falta de investigaciones en esta área también limitaría la capacidad de adaptación al cambio climático, dejando a comunidades y ecosistemas más vulnerables a los impactos negativos de los eventos hidrológicos (Nazeer et al. 2022).

La relación entre precipitación y escorrentía se origina en múltiples factores, como la irregularidad en la intensidad y distribución de la lluvia, la topografía de la región y las propiedades del suelo. Estos elementos influyen directamente en la cantidad de agua que fluye superficialmente a través de una cuenca hidrográfica(Tian et al. 2020). La precipitación intensa o prolongada puede generar escorrentía excesiva, desencadenando inundaciones devastadoras, erosión del suelo y pérdida de infraestructuras. Por otro lado,



la falta de precipitación puede llevar a sequías, afectando gravemente la disponibilidad de agua para la agricultura, las comunidades y la biodiversidad(Tian et al. 2020).

En China, se encontró que existe una conexión significativa entre la precipitación y la escorrentía en diversas regiones. En la región sur, se registró un promedio del 82% de correlación entre la lluvia y el agua superficial, destacando la alta influencia de la precipitación en la escorrentía. (Zhang et al. 2019).

En Polonia, estudios revelan variaciones: en el sur, la correlación precipitación-escorrentía promedia un 55%, impactada por la topografía montañosa. En el norte, se registra un promedio del 70%, reflejando una relación más directa, influenciada por la naturaleza del suelo y uso de la tierra. Además, se observa un aumento del 15% en la escorrentía por cada 100 mm de lluvia en el norte, mientras que, en el sur, este incremento alcanza el 8%(Laouacheria, Kechida, and Chabi 2019).

En la región Libertad, Perú, mostraron que la escorrentía superficial, se constató una disminución en la mayoría de los escenarios, excepto en MIROC-ESM RCP (Model for Interdisciplinary Research On Climate - Earth System Model) RCP (Representative Concentration Pathways), donde se reportó un incremento del 2.2%. Estos resultados indican una tendencia general hacia una reducción en la precipitación y la escorrentía, acompañada de un aumento global de las temperaturas, señalando posibles cambios significativos en el equilibrio hídrico de la región para el 2050(Quezada 2021).

En la cuenca del río Tambo, sur de Perú, se estudió 55 subcuencas durante cuatro décadas. El modelo SWAT, validado con Nash, PBIAS, RSR y R2, mostró buenos valores diarios y mensuales. En la zona alta, la precipitación, evapotranspiración, flujo base y escorrentía fueron mayores. Los caudales extremos variaron entre décadas y se analizó la

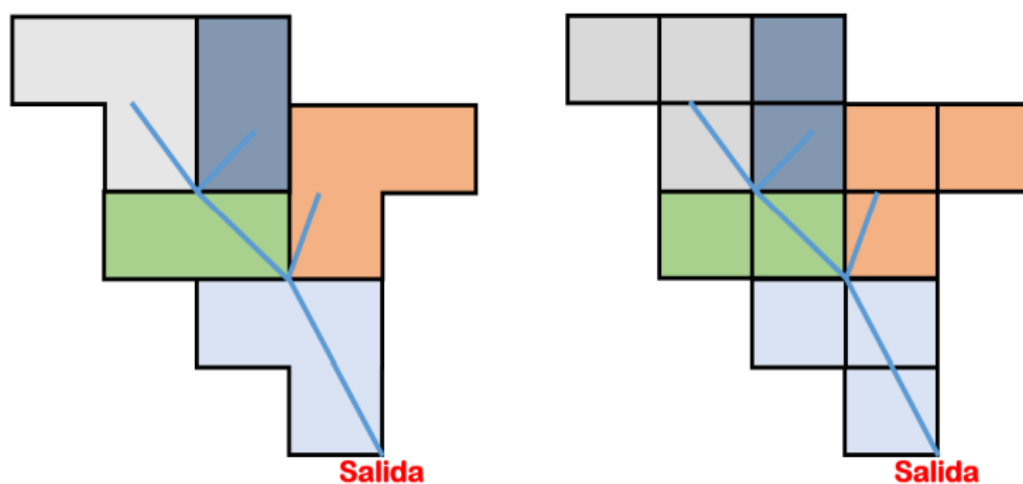
persistencia del 75%. Índices climáticos señalaron aumentos térmicos, sin cambios en la precipitación(Jiménez 2021).

En Puno se obtuvieron resultados satisfactorios y muy buenos. Los valores de eficiencia, evaluados a nivel diario y mensual mediante las estadísticas NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency) y PBIAS(Percent Bias), mostraron rendimientos positivos, como NSE de 0.72 y 0.69 en la calibración y NSE de 0.78 y 0.77 en la validación a nivel mensual. Los porcentajes de PBIAS también reflejaron buenos resultados, con valores de -8.9% y 2.2% en la calibración, y -18.7% y 5.3% en la validación, respectivamente Centeno, (2022b).

El propósito de esta investigación fue describir modelos hidrológicos para relacionar la precipitación y escorrentía bajo esquemas de discretización a la Cuenca del río Coata.

Figura 1

Representación gráfica de discretización de la Cuenca del río Coata



Para evaluar el desempeño del modelo durante la etapa de calibración y validación, se empleó tres índices estadísticos distintos: la eficiencia medida por Nash-

Sutcliffe (NSE, ecuación 7), el porcentaje de sesgo (PBIAS, ecuación 8) y el error medio absoluto (MAE, ecuación 9) para determinar el error promedio de la estimación en m³/s. El PBIAS se emplea para evaluar la tendencia media, ya sea positiva o negativa, entre los valores simulados de descarga y los valores observados. Un PBIAS positivo (negativo) indica una sobreestimación (subestimación).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \dots\dots\dots(8)$$

$$MAE = 1/n \times \sum |(S_i - O_i)| \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

O_i es la variable observada,

S_i es la variable simulada,

O_p es el promedio de la variable observada,

n es el número de observaciones bajo consideración

1.1.1. Pregunta general

¿Cuál es el análisis comparativo de modelos hidrológicos precipitación y escorrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata?

1.1.2. Preguntas específicas

¿Cómo es la descripción del balance anual de agua de precipitación, evapotranspiración y escorrentía en la Cuenca del río Coata 2000 – 2020?

¿Cómo es la descripción de la precipitación promedio en diferentes escalas temporales en la Cuenca del río Coata 2000-2020?



¿Cómo es la descripción de la precipitación, y disponibilidad hídrica en la Cuenca del río Coata 2000-2020?

¿Cómo es la descripción de las proyecciones hidrológicas precipitación, escorrentía y caudal de la Cuenca del río Coata 2020-2040?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Describir y analizar modelos hidrológicos precipitación y escorrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata.

1.2.2. Objetivos específicos

Describir el balance anual de agua de precipitación, evapotranspiración y escorrentía en la Cuenca del río Coata 2000 – 2020.

Describir y analizar la precipitación promedio en diferentes escalas temporales en la Cuenca del río Coata 2000-2020.

Describir la precipitación, y disponibilidad hídrica en la Cuenca del río Coata 2000-2020.

Describir las proyecciones hidrológicas precipitación, escorrentía y caudal de la Cuenca del río Coata 2020-2040.

1.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis del investigador

Existe relación entre la precipitación y escorrentía usando modelos hidrológicos bajo esquemas de discretización a la Cuenca del río Coata.



1.3.2. Hipótesis nula

No existe relación entre la precipitación y escorrentía usando modelos hidrológicos bajo esquemas de discretización a la Cuenca del río Coata.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

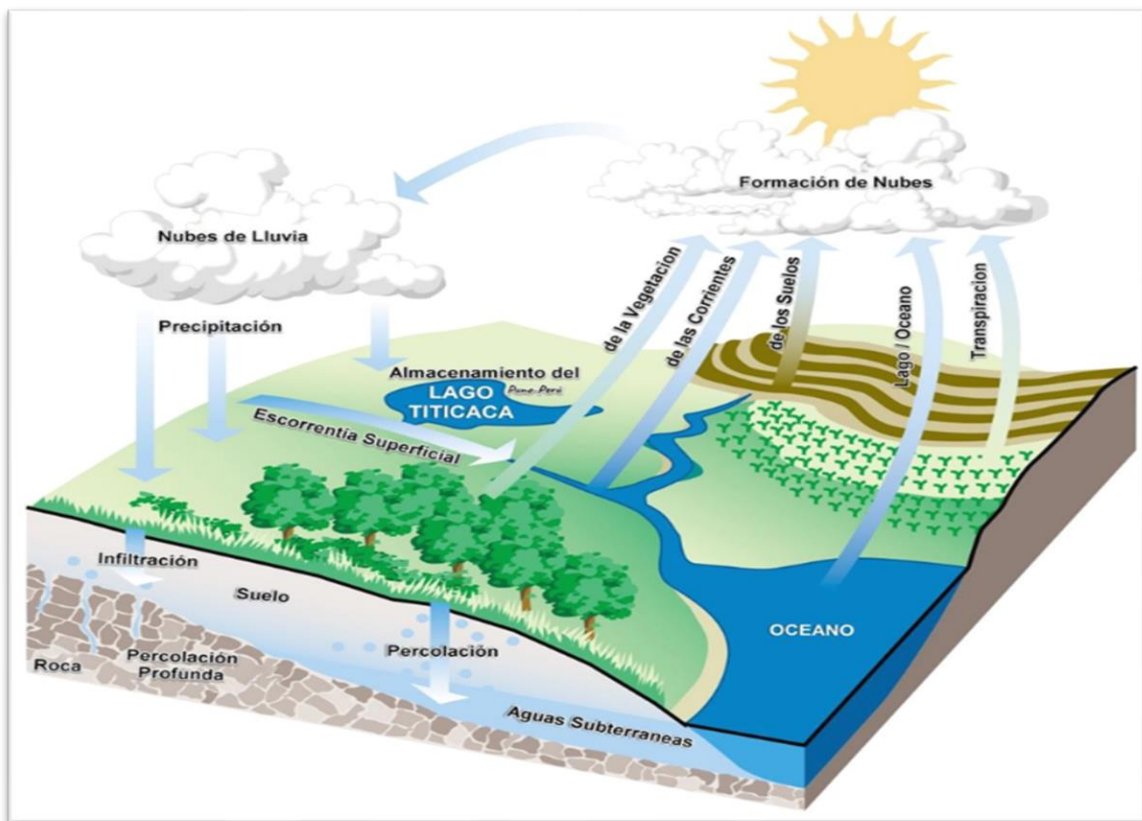
2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico no posee un principio ni un final, ya que los procesos que tienen lugar en él ocurren de manera continua. Se define como la secuencia de transformaciones que experimenta el agua en la naturaleza, pasando por sus estados sólido, líquido y gaseoso, incluyendo también sus formas como aguas superficiales y subterráneas (Obianyo 2019).

Figura 2

Ciclo Hidrológico



Fuente: The Federal Interagency Stream Restoration Working Group (1998)



2.1.2. Fase terrestre del ciclo hidrológico

Uno de los componentes del modelo SWAT corresponde a la simulación de todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico, lo cual permite realizar un balance hídrico en toda la cuenca; este ciclo controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen a través de las microcuencas hacia las redes de drenaje

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw}) ..$$

Donde:

SW_t es el contenido final de agua en el suelo en mm de H₂O,

SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo,

R_{day} es la cantidad de precipitación,

Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie,

ET_a es la cantidad de evapotranspiración real,

W_{seep} es la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo y

Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno.

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca.



2.2. LA PRECIPITACIÓN

Se refiere al proceso climático mediante el cual el agua, en forma de lluvia, nieve, granizo u otras formas, cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Este fenómeno hidrometeorológico es de suma importancia para la agricultura, ya que determina la cantidad y distribución del agua disponible para los cultivos. La lluvia, la forma más común de precipitación, influye directamente en la cantidad de humedad en el suelo, la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para el riego de cultivos. La variabilidad en la cantidad y la frecuencia de la precipitación puede tener un impacto significativo en la planificación agrícola, afectando los ciclos de siembra, crecimiento y cosecha de los cultivos, así como la gestión de recursos hídricos(Karki 2020).

La precipitación es un factor climático clave que afecta de manera significativa la producción agrícola. Su comprensión y gestión adecuada son fundamentales para el diseño de estrategias de riego, la selección de cultivos adaptados a diferentes condiciones climáticas y la planificación eficiente de las actividades agrícolas, contribuyendo así a la sostenibilidad y productividad(Tomy and Sumam 2016).

2.2.1. Naturaleza de la precipitación

La precipitación es un fenómeno hidrometeorológico esencial en la dinámica terrestre, consistente en la transferencia de humedad atmosférica hacia la superficie terrestre en forma de agua o hielo. Este proceso es vital para mantener los ciclos hidrológicos y climáticos, influyendo significativamente en la disponibilidad de agua para los sistemas agrícolas(Zhang et al. 2019).



2.2.2. Formas de precipitación

Lluvia

Es la forma más común de precipitación, compuesta por gotas de agua líquida de diversos tamaños que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Su impacto en la agricultura es significativo, ya que influye en la disponibilidad de agua para los cultivos, la erosión del suelo y los ciclos de siembra y cosecha(Perz, Sobkowiak, and Wrzesiński 2021).

Naturaleza de la Lluvia

La lluvia es el fenómeno más común de precipitación, manifestándose como gotas de agua líquida que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Se origina cuando el vapor de agua en las nubes se condensa y forma gotas lo suficientemente pesadas como para caer debido a la gravedad(Perz et al. 2021).

Características de la Lluvia

La lluvia puede variar en intensidad, duración y distribución espacial. La intensidad se refiere a la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo y área, mientras que la duración indica el tiempo durante el cual la lluvia persiste. Su distribución puede ser uniforme, intermitente o torrencial, afectando la cantidad total de agua recibida en una región(Perz et al. 2021).

Impacto en la Agricultura

La lluvia juega un papel crítico en la agricultura, ya que influye en la humedad del suelo, la infiltración, la erosión y el ciclo de vida de los cultivos. Una lluvia adecuada y bien distribuida puede proporcionar la humedad necesaria para el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, lluvias intensas y prolongadas pueden



causar encharcamientos, erosión del suelo y riesgos de inundaciones, afectando negativamente la productividad agrícola(Perz et al. 2021).

Medición y Registro

La lluvia se registra a través de pluviómetros, dispositivos que capturan y miden la cantidad de precipitación en un área específica. Estos instrumentos proporcionan datos sobre la cantidad de lluvia caída en milímetros, permitiendo analizar patrones climáticos y estimar la disponibilidad de agua para los cultivos(Perz et al. 2021).

Gestión y Planificación Agrícola

La comprensión de los patrones de lluvia es esencial para la planificación agrícola. Ayuda a determinar los momentos óptimos de siembra, riego y cosecha, así como a implementar estrategias de conservación de suelos y gestión hídrica. Los agricultores utilizan información histórica de lluvias para optimizar la selección de cultivos adaptados a los patrones climáticos locales(Perz et al. 2021).

Nieve

La nieve, compuesta por cristales de hielo que se agrupan en copos, es más frecuente en regiones de climas fríos. Su acumulación durante la temporada invernal puede ser crucial para la provisión de agua durante el deshielo, actuando como una reserva de agua esencial para la irrigación y el suministro hídrico(Van Beusekom and Viger 2016).

Naturaleza de la Nieve

La nieve es una forma de precipitación atmosférica que se origina por la cristalización del vapor de agua en la atmósfera, formando cristales de hielo que se agrupan en copos. Se presenta comúnmente en regiones con climas fríos y



constituye una importante fuente de almacenamiento de agua durante la temporada invernal (Hou, Jiang, and Sun 2020).

Características y Comportamiento

Los copos de nieve pueden variar en tamaño, forma y densidad, dependiendo de la temperatura y las condiciones atmosféricas. Su acumulación se presenta en capas, proporcionando un manto blanco en el suelo. A medida que la temperatura aumenta, la nieve puede derretirse y convertirse en agua líquida, contribuyendo al suministro de agua en arroyos y mantos freáticos durante la temporada de deshielo (Hou et al. 2020)

Impacto en la Agricultura

La nieve tiene un impacto diferenciado en la agricultura. Por un lado, su acumulación durante el invierno puede servir como reserva de agua para la recarga de acuíferos y la irrigación durante la temporada seca. Por otro lado, su exceso puede retrasar las siembras, afectar el crecimiento de los cultivos y provocar daños por heladas en plantas sensibles(Hou et al. 2020).

Gestión y Aprovechamiento Agrícola

Los agricultores en regiones con presencia de nieve suelen aprovechar su derretimiento gradual para el riego de sus cultivos durante la primavera y el verano. Además, la nieve acumulada puede actuar como un aislante natural para proteger los cultivos de las temperaturas extremas(Hou et al. 2020).

Riesgos y Desafíos Agrícolas

La presencia excesiva de nieve puede ocasionar dificultades en la movilización de maquinaria agrícola, retrasar las labores de preparación de suelos



e incluso generar deslizamientos en terrenos inclinados. Asimismo, las heladas tardías pueden dañar brotes y cultivos en desarrollo(Hou et al. 2020).

Granizo

El granizo, menos común pero impactante, está constituido por bolas de hielo sólido formadas en condiciones atmosféricas específicas. Este fenómeno puede causar daños considerables en los cultivos, destruyendo cosechas y requiriendo medidas de protección y manejo específicas para mitigar pérdidas económicas(Yu, Deyong, and Chen 2022).

Naturaleza del Granizo

El granizo es una forma poco común de precipitación caracterizada por la caída de pequeñas bolas o piedras de hielo sólido desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Se forma en nubes de tormenta cuando gotas de agua superenfriadas se congelan al entrar en contacto con partículas de polvo o congelación por ráfagas ascendentes de aire(Yu et al. 2022).

Características y Formación

Las piedras de granizo pueden variar en tamaño, desde pequeñas esferas hasta grandes fragmentos de hielo, dependiendo de la intensidad de la tormenta. El proceso de formación del granizo puede ser rápido, con capas concéntricas de hielo que se acumulan alrededor de un núcleo central. Su composición es similar a la de un cubo de hielo, pero su tamaño y estructura pueden variar según las condiciones climáticas específicas(Yu et al. 2022).

Impacto en la Agricultura

El granizo representa un riesgo significativo para la agricultura. Cuando ocurren tormentas de granizo, las piedras pueden golpear y dañar los cultivos,



causando lesiones en las hojas, tallos y frutos. Los cultivos más vulnerables al granizo son los frutales, hortalizas y cultivos de temporada. Los daños pueden ser devastadores, llevando a pérdidas económicas considerables para los agricultores(Yu et al. 2022).

Gestión y Prevención

Aunque el granizo es impredecible, existen medidas de prevención que los agricultores pueden tomar para minimizar los daños. Algunas estrategias incluyen el uso de redes de protección, estructuras cubiertas, sistemas de riego que pueden actuar como amortiguadores y seguros agrícolas que ayuden a mitigar las pérdidas financieras en caso de daños por granizo(Yu et al. 2022).

Impacto Económico y Social

Los eventos de granizo pueden tener un impacto económico significativo en la agricultura, ya que pueden arruinar cosechas enteras, disminuir la producción y afectar la rentabilidad de los agricultores. Además, estos eventos pueden tener repercusiones sociales, especialmente en comunidades que dependen de la agricultura como principal fuente de ingresos(Yu et al. 2022).

Características y efectos en la agricultura

La lluvia, por su recurrencia y distribución temporal, influye directamente en la cantidad de humedad en el suelo y en la capacidad de infiltración, afectando los procesos de siembra, crecimiento y cosecha. La nieve, aunque menos frecuente, puede ser una fuente valiosa de agua durante el deshielo, pero su exceso puede retrasar siembras y dañar cultivos por las bajas temperaturas prolongadas(Yu et al. 2022).



2.3. LA ESCORRENTÍA

Es el flujo de agua que se desplaza sobre la superficie del suelo debido a la incapacidad del terreno para absorber toda la precipitación. Este fenómeno ocurre cuando la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, transportando agua, sedimentos y nutrientes a través de ríos, arroyos y cuerpos de agua (Mohammad and Adam 2010). Factores como la pendiente del terreno, la textura del suelo y la cobertura vegetal influyen en la cantidad de escorrentía generada. Aunque la escorrentía puede contribuir a la recarga de acuíferos y aportar humedad a áreas agrícolas, un exceso de este flujo puede causar erosión del suelo, pérdida de nutrientes y contaminación de fuentes de agua, afectando la calidad del suelo y la producción agrícola. Su adecuado manejo con prácticas de conservación del suelo, siembra en curvas de nivel y técnicas de retención ayuda a minimizar los efectos negativos en los sistemas agrícolas y a preservar los recursos hídricos (Lozano-Rivas 2018).

2.3.1. Naturaleza de la Escorrentía

La escorrentía se refiere al movimiento del agua sobre la superficie del suelo debido a la precipitación excedente que no puede ser absorbida por el terreno o infiltrarse en él. Este flujo superficial es crucial en el ciclo hidrológico, transportando agua, sedimentos y nutrientes a través de ríos, arroyos y cuerpos de agua (Lozano-Rivas 2018).

2.3.2. Factores que influyen en la capacidad de infiltración

Textura del Suelo: Los suelos arenosos tienden a tener una mayor capacidad de infiltración debido a su granulometría, permitiendo una rápida penetración del agua. En contraste, los suelos arcillosos, con partículas más finas y compactas, presentan una menor capacidad de infiltración debido a su menor porosidad (Lozano-Rivas 2018).



Estructura del Suelo: La estructura del suelo, determinada por la organización de las partículas y la presencia de agregados o grumos, afecta significativamente la capacidad de infiltración. Los suelos bien estructurados suelen tener una mayor porosidad, permitiendo una mejor absorción del agua(Lozano-Rivas 2018).

Contenido de materia orgánica: La presencia de materia orgánica en el suelo mejora su capacidad de infiltración al favorecer la formación de agregados estables y porosidad, lo que facilita la entrada y retención del agua (Lozano-Rivas 2018).

2.3.3. Procesos que influyen en la escorrentía

La escorrentía es un proceso hidrológico complejo influido por diversos factores. La precipitación es el detonante principal: su intensidad y distribución determinan en gran medida la cantidad de agua que se convertirá en escorrentía. La capacidad de infiltración del suelo también juega un papel importante; suelos compactos o con baja capacidad de absorción tienden a generar más escorrentía superficial. La topografía del terreno modula la velocidad y dirección del flujo de agua(Singh, Kaushik, and Sharma 2022).

2.3.4. Impacto de la Escorrentía en la Agricultura

El impacto de la escorrentía en la agricultura es considerable. Si bien la escorrentía puede proveer cierta humedad para los cultivos, un exceso puede provocar erosión, pérdida de suelo fértil, y contaminación de cursos de agua con sedimentos y químicos provenientes de fertilizantes o pesticidas. El manejo inadecuado de la escorrentía puede resultar en pérdidas significativas de tierra productiva y degradación de ecosistemas, afectando la sostenibilidad de las prácticas agrícolas(Singh et al. 2022).

2.3.5. Gestión y Mitigación de la Escorrentía

La gestión efectiva de la escorrentía implica implementar estrategias de conservación del suelo, como terrazas, rotación de cultivos, y técnicas de labranza conservacionista para reducir la erosión y aumentar la infiltración del agua en el suelo (Singh et al. 2022).

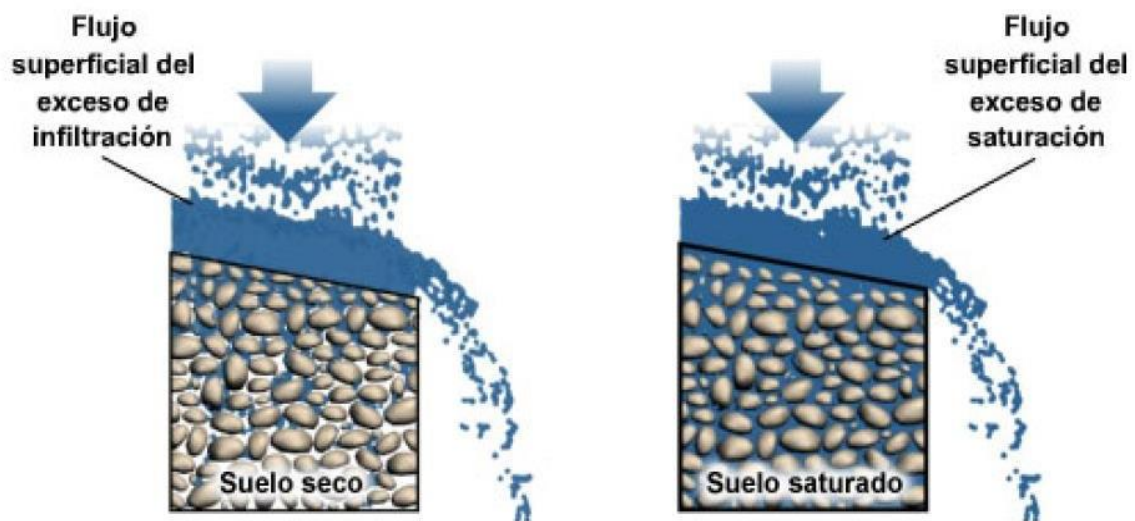
2.3.6. Tipos de escorrentía:

Escorrentía superficial directa

La escorrentía superficial directa se produce cuando el suelo no puede absorber más agua debido a su saturación o impermeabilidad. En esta forma de escorrentía, el agua fluye sobre la superficie del suelo hacia los cursos de agua o cuerpos receptores. Este tipo de escorrentía tiende a ocurrir en suelos compactados, urbanizados o con una capa superficial impermeable, provocando un rápido flujo de agua y aumentando el riesgo de erosión (Ding et al. 2022).

Figura 3

Tipos de Formación de Escorrentía Superficial



Fuente: www.meted.ucar.edu



Escorrentía subsuperficial o intermedia

La escorrentía subsuperficial ocurre cuando el suelo no está completamente saturado, permitiendo que el agua se desplace horizontalmente a través del suelo antes de llegar a las corrientes de agua. Este tipo de escorrentía sucede en suelos con cierta capacidad de infiltración, donde parte del agua puede moverse a través de capas subsuperficiales, contribuyendo a la recarga de acuíferos y manteniendo el flujo base en ríos y arroyos(Ding et al. 2022).

Escorrentía por infiltración excesiva

Este tipo de escorrentía ocurre en suelos con una capacidad de infiltración temporalmente limitada. Cuando la tasa de precipitación excede la velocidad de infiltración del suelo, el agua se acumula en la superficie, generando una escorrentía temporal antes de que se produzca la infiltración. Este fenómeno puede ocurrir tras lluvias intensas o en suelos con una capa superficial saturada (Ding et al. 2022).

Escorrentía de base o subterránea

La escorrentía de base es un flujo lento y constante de agua hacia arroyos o cuerpos de agua proveniente de aguas subterráneas. Esta forma de escorrentía mantiene el caudal base de los ríos durante períodos secos y contribuye a mantener la humedad en suelos y zonas ribereñas (Ding et al. 2022).

Escorrentía por derretimiento de nieve o glaciares

El derretimiento de nieve o glaciares produce un tipo específico de escorrentía. A medida que la nieve o el hielo se funden, el agua se convierte en escorrentía superficial, aportando agua a los ríos y lagos. Este fenómeno es común en áreas montañosas y puede influir en el caudal de los ríos estacionales(Ding et al. 2022).

2.4. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Abarca el proceso mediante el cual el agua en estado líquido y sólido en las proximidades de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. Este proceso comprende la evaporación desde cuerpos de agua, suelos desnudos y superficies vegetales, la liberación de vapor desde el interior de las hojas (transpiración) y la conversión de hielo o nieve directamente en vapor (sublimación). En el modelo, se calcula por separado la evaporación del suelo y de las plantas. La transpiración real del suelo se estima mediante una función exponencial basada en su profundidad y humedad. La transpiración de las plantas se simula como una función lineal, dependiendo de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar (Bazarzhapov et al. 2023).

2.4.1. Proceso de evapotranspiración

La evapotranspiración es la pérdida de agua desde la superficie del suelo y las plantas hacia la atmósfera. Se compone de dos procesos: la evaporación, que ocurre desde la superficie del suelo, cuerpos de agua o vegetación, y la transpiración, la pérdida de agua a través de las hojas de las plantas durante la fotosíntesis (Ding et al. 2022).

2.4.2. Factores que Influyen

Diversos factores afectan la evapotranspiración. La radiación solar, la temperatura atmosférica, la humedad relativa, la velocidad del viento y la disponibilidad de agua en el suelo son elementos determinantes. La cobertura vegetal y el tipo de suelo también juegan un papel crucial en este proceso, ya que afectan la cantidad de agua que se transfiere desde el suelo a la atmósfera (Ding et al. 2022).



2.4.3. Métodos de medición y estimación

Métodos directos

Los métodos directos, como la lisimetría, implican la medición directa de la cantidad de agua perdida por evaporación y transpiración en sistemas controlados. Los lisímetros son recipientes aislados que permiten la medición precisa de estos flujos hídricos (Ding et al. 2022).

Métodos indirectos y modelos

Los métodos indirectos emplean instrumentos y datos meteorológicos para estimar la evapotranspiración. Se utilizan ecuaciones empíricas y modelos matemáticos que consideran variables climáticas y características del entorno para calcular este proceso en áreas extensas donde la medición directa es difícil (Ding et al. 2022).

2.5. MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

La modelización de cuencas hidrográficas se refiere al análisis de áreas que comparten sistemas de drenaje naturales. Básicamente, una cuenca hidrográfica es el territorio drenado por un río o arroyo que integra distintos procesos hidrológicos. Esta modelización se basa en la interconexión entre el suelo, el agua, el clima y el uso del terreno, representada a través de formulaciones matemáticas. Cada proceso hidrológico está influido no solo por sus propias particularidades, sino también por su relación con otros procesos activos en la cuenca (Ali et al., 2023).

2.6. MODELOS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos son herramientas fundamentales en la gestión de recursos hídricos. Estos modelos, basados en principios matemáticos y físicos, permiten simular el comportamiento de los procesos hidrológicos en una cuenca, incluyendo la precipitación, escorrentía, infiltración y evaporación. Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en modelos conceptuales, empíricos y basados en la física, cada uno con enfoques y aplicaciones específicas (Ali et al., 2023).

La relación entre el paso de tiempo de la modelización y el área de la cuenca radica en la representación simplificada de sistemas hidrológicos a través de modelos. Estos modelos buscan predecir el caudal basándose en principios físicos (Ali et al., 2023).

Figura 4

Los modelos hidrológicos conceptos de parametrización diferentes.

	Estructura del Modelo	Estructura de Parámetros
Agregado		<p>θ: Conjunto de Parámetros Únicos</p>
Semi Distribuido		<p>Conjunto de Parámetros de la Subcuenca θ_i: $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_{n-1} \neq \theta_n$ n: Número de Subcuencas</p>
Distribuido		<p>Conjunto de Parámetros de la Grilla θ_i: $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_{n-1} \neq \theta_n$ n: Número de Grillas</p>

Adaptada por (Centeno T. 2022a)

Modelos de balance hídrico

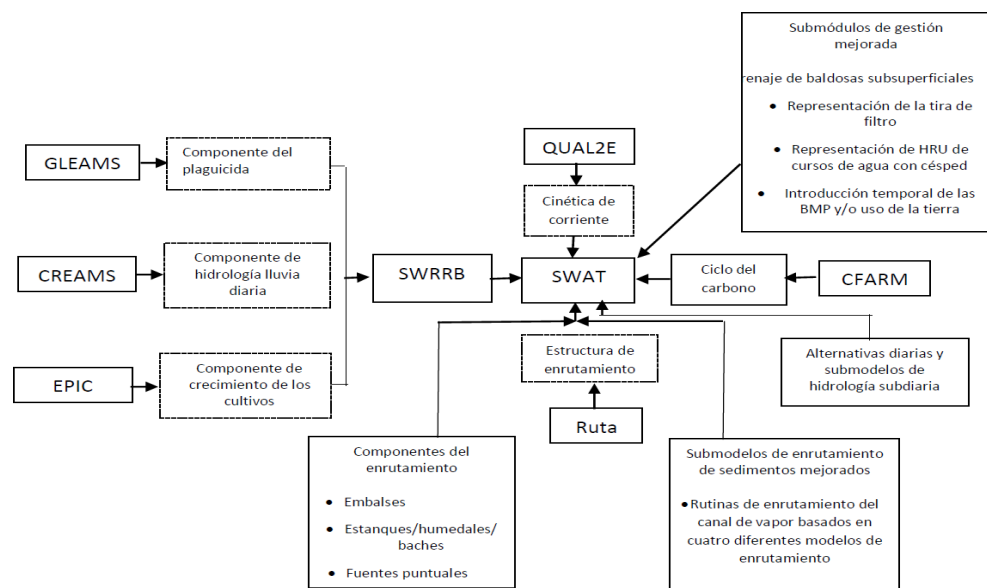
Los modelos de balance hídrico son estructuras matemáticas que se utilizan en hidrología para evaluar y cuantificar el flujo de agua entrante y saliente en un sistema hidrológico. Estos modelos se basan en el principio fundamental de conservación de masa, donde se analizan las diversas entradas, salidas y almacenamientos de agua en un área determinada (Ali et al., 2023).

2.6.1. Modelo Hidrológico Swat (Soil And Water Assessment Tool)

Es una herramienta computacional poderosa utilizada para simular procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas. Este modelo, diseñado para evaluar el impacto del uso del suelo, prácticas agrícolas y condiciones climáticas en la cantidad y calidad del agua, integra información topográfica, climática y de uso del suelo. (Jaberzadeh et al. 2022).

Figura 5

Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados



Fuente: (Jaberzadeh et al. 2022).

2.6.2. Funciones del modelo hidrológico swat

Simulación de Ciclo Hidrológico:

Una de las fortalezas del modelo SWAT es su habilidad para simular de manera precisa y detallada el ciclo hidrológico. Esto incluye estimaciones de la escorrentía, infiltración, evaporación, transpiración de las plantas, escurrimiento superficial y recarga de acuíferos. La capacidad del modelo para representar estos procesos hidrológicos permite evaluar y predecir cómo los cambios en las condiciones climáticas o el uso del suelo afectan el balance hídrico de la cuenca (Ali 2023).

Representación detallada de la cuenca:

El modelo SWAT se destaca por su capacidad para dividir las cuencas hidrográficas en subcuencas y unidades de almacenamiento más pequeñas. Esta división permite una representación más detallada de la topografía, suelos, uso de la tierra y condiciones climáticas dentro de la cuenca. Este nivel de detalle es crucial para comprender mejor los procesos hidrológicos en diferentes áreas de la cuenca y cómo interactúan entre sí (Pomeroy et al. 2022).

Gestión del Uso de la Tierra:

El SWAT permite evaluar diferentes prácticas de manejo de la tierra, como cultivos, rotaciones, sistemas de cultivo y prácticas de conservación del suelo. Al modelar el impacto de estas prácticas en la hidrología, el modelo puede ayudar a los gestores de cuencas y a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre cómo optimizar el uso del suelo y conservar los recursos hídricos (Pomeroy et al. 2022).

Modelado de la Calidad del Agua:

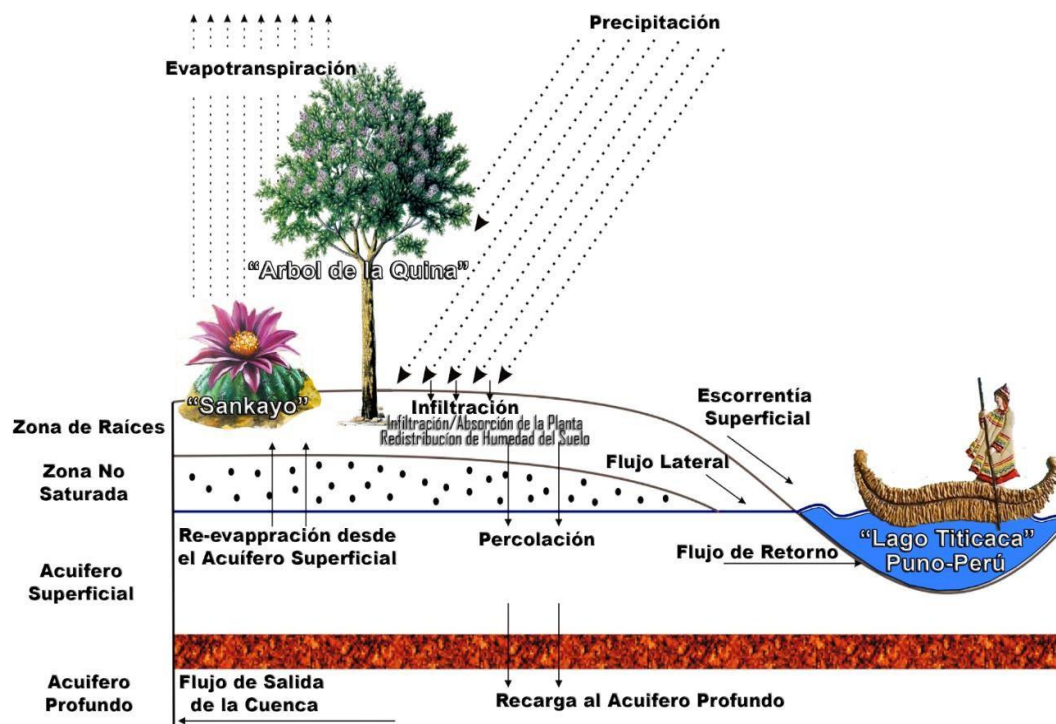
Además de simular el flujo de agua, el modelo SWAT también evalúa la calidad del agua. Puede estimar la carga de contaminantes, como nutrientes y sedimentos, provenientes de actividades agrícolas, urbanas o industriales (Natumanya et al. 2022).

Aplicaciones Diversas:

SWAT se aplica en una amplia gama de estudios, desde la conservación de suelos hasta la planificación del uso del agua, evaluación de impactos ambientales y gestión de cuencas hidrográficas. Su versatilidad y capacidad para abordar múltiples aspectos de la hidrología lo hacen valioso en la toma de decisiones relacionadas con recursos hídricos y gestión de cuencas (Karki 2020).

Figura 6

Representación de los movimientos del agua en SWAT



Fuente: Imagen adaptada por (Centeno T. 2022a)

2.7. ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)

Es un satélite japonés diseñado para observación terrestre avanzada. Equipado con un radar de apertura sintética de banda L, ALOS PALSAR proporciona imágenes detalladas de la superficie terrestre, independientemente de las condiciones climáticas o de iluminación. Sus funciones incluyen la monitorización de cambios en la cobertura del suelo, la detección de deforestación, la evaluación de desastres naturales y la investigación científica en diversas disciplinas. Este sistema contribuye significativamente al estudio y la gestión del medio ambiente a nivel global (Deus 2016).

Funciones del ALOS PALSAR

Imagen de la Tierra: PALSAR proporciona imágenes de alta resolución de la superficie terrestre utilizando la tecnología de radar de apertura sintética (SAR). Esto permite la obtención de datos detallados independientemente de las condiciones climáticas o de iluminación (Scarth et al. 2019).

Monitorización de Cambios en la Superficie: PALSAR es valioso para la monitorización de cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Puede detectar cambios en la vegetación, la topografía y la estructura del terreno, lo que resulta útil para estudios de cambio ambiental y planificación del uso del suelo (Scarth et al. 2019).

Detección de Deforestación: El radar SAR puede penetrar la cobertura de nubes y la vegetación, lo que facilita la detección de actividades de deforestación. PALSAR se ha utilizado para monitorear la pérdida de bosques y evaluar el impacto ambiental (Scarth et al. 2019).



Evaluación de Desastres Naturales: PALSAR es eficaz para la evaluación de desastres naturales, como terremotos, inundaciones o deslizamientos de tierra. Puede proporcionar información detallada sobre las áreas afectadas y ayudar en las labores de respuesta y recuperación(Scarth et al. 2019).

Investigación Científica: Las imágenes SAR de ALOS también son utilizadas en investigaciones científicas, como estudios geofísicos, oceanográficos y glaciológicos, ofreciendo datos valiosos para comprender mejor la dinámica de la Tierra(Scarth et al. 2019).

2.8. OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS

2.8.1. El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic

Modeling System)

Es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos que proporciona una plataforma integral para modelar y simular eventos hidrológicos en cuencas hidrográficas. Este sistema, altamente reconocido, ofrece una gama de herramientas para analizar el comportamiento hidrológico y predecir la respuesta de una cuenca ante diferentes condiciones climáticas y de uso del suelo(Ikhwali et al. 2022).

Características y funcionalidades del HEC-HMS

Simulación hidrológica detallada

El HEC-HMS permite una representación detallada de las cuencas hidrográficas, descomponiéndolas en subcuencas y elementos hidrológicos para modelar de manera precisa los procesos de escorrentía, infiltración y flujo en los diferentes componentes de la cuenca(Ikhwali et al. 2022).



Interfaz Gráfica de Usuario Intuitiva: Ofrece una interfaz amigable que facilita la introducción de datos, la configuración de modelos y la visualización de resultados, lo que agiliza el proceso de modelado y análisis hidrológico(Ikhwali et al. 2022).

Incorporación de datos hidrometeorológicos: Permite la integración de datos meteorológicos y de topografía, utilizando información de estaciones climáticas, series temporales de precipitación y evapotranspiración para realizar simulaciones hidrológicas precisas(Ikhwali et al. 2022).

Modelado de escenarios: Facilita la creación y evaluación de múltiples escenarios hidrológicos, permitiendo analizar los efectos de diferentes eventos climáticos o cambios en el uso del suelo en la respuesta de la cuenca(Ikhwali et al. 2022).

Evaluación de caudales e hidrogramas: El software puede generar hidrogramas y estimar caudales en diferentes puntos de la cuenca, lo que ayuda en el diseño y evaluación de infraestructuras hidráulicas, como presas, canales y sistemas de drenaje(Ikhwali et al. 2022).

2.8.2. Modelo Hidrológico HEC-HMS Aplicaciones del HEC-HMS:

El HEC-HMS se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo el diseño de obras hidráulicas, estudios de riesgo de inundaciones, planificación del uso del agua, evaluación de impactos ambientales y gestión de recursos hídricos. Su capacidad para simular y predecir el comportamiento hidrológico lo convierte en una herramienta esencial para ingenieros, hidrólogos y planificadores que buscan comprender y gestionar los recursos hídricos de una cuenca(Kazezyılmaz-Alhan et al. 2021).



Características y Funcionalidades Principales de MIKE SHE:

Integración de Procesos Hidrológicos: MIKE SHE tiene la capacidad de simular una amplia gama de procesos hidrológicos, incluyendo la infiltración, recarga de acuíferos, flujo subterráneo, interacción suelo-agua, y flujos superficiales como escorrentía y drenaje.(Kazezyılmaz-Alhan et al. 2021)

Modelado 3D de Cuencas:

Ofrece la posibilidad de representar la topografía tridimensional y las variaciones en la geología y estructura del suelo, lo que proporciona una simulación más detallada de los procesos hidrológicos en la cuenca(Kazezyılmaz-Alhan et al. 2021).

Análisis de Interacciones Agua Superficial-Subterránea:

MIKE SHE permite evaluar cómo los cambios en la gestión del agua superficial impactan el nivel de agua subterránea y viceversa, lo que es vital para la gestión integrada de recursos hídricos(Kazezyılmaz-Alhan et al. 2021).

Simulaciones a Largo Plazo y Cambio Climático:

Facilita la evaluación de escenarios a largo plazo y predicciones climáticas para entender cómo podrían cambiar los patrones hidrológicos debido al cambio climático (Kazezyılmaz-Alhan et al. 2021).

SWMM (Storm Water Management Model)

Es un modelo hidrológico desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este software se utiliza para simular el movimiento y la calidad del agua en sistemas de drenaje urbano, con un enfoque



en la gestión de aguas pluviales y el control de la contaminación generada por escorrentías urbanas (Laouacheria et al. 2019).

Características clave del SWMM:

Simulación hidráulica: Permite la simulación del flujo hidráulico en sistemas de alcantarillado, incluyendo tuberías, canales, compuertas, y estructuras de control (Laouacheria et al. 2019).

Modelado de calidad del agua: Además de simular el flujo, evalúa la calidad del agua considerando la contaminación por escorrentía, permitiendo el análisis de la carga de contaminantes y la efectividad de medidas de control (Laouacheria et al. 2019).

Interfaz gráfica de usuario: Ofrece una interfaz amigable que facilita la introducción de datos, la configuración de modelos y la visualización de resultados, lo que permite realizar análisis más efectivos (Laouacheria et al. 2019).

Diseño de infraestructura: Utilizado en el diseño y evaluación de sistemas de drenaje urbano, infraestructuras de control de inundaciones, y en la planificación de sistemas de tratamiento de aguas pluviales (Laouacheria et al. 2019).

Aplicaciones del SWMM:

Se utiliza en el diseño de infraestructuras hidráulicas urbanas, en la gestión de riesgos de inundaciones, evaluación de calidad del agua, y en la planificación de sistemas de drenaje para reducir la contaminación de las aguas pluviales. Su capacidad para simular el movimiento del agua y los contaminantes en sistemas urbanos lo hace una herramienta valiosa para ingenieros civiles, planificadores urbanos y profesionales del agua (Laouacheria et al. 2019).

2.8.3. WRF-hydro (Weather Research And Forecasting Hydrological Model)

El WRF-Hydro es un modelo hidrológico desarrollado como una extensión del modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF). Esta herramienta combina la predicción meteorológica del modelo WRF con la simulación del ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, permitiendo evaluar el comportamiento del agua en respuesta a condiciones climáticas(Cho and Kim 2022).

Características Clave del WRF-Hydro:

Integración de Modelos Meteorológicos e Hidrológicos: Combina datos meteorológicos del modelo WRF con algoritmos hidrológicos para simular procesos hidrológicos en la cuenca(Cho and Kim 2022).

Predicción hidrológica: Permite pronosticar variables hidrológicas como escorrentía, niveles de ríos, caudales y acumulación de agua en la cuenca(Cho and Kim 2022).

Incorporación de datos hidrometeorológicos: Utiliza datos observados y pronosticados de precipitación, temperatura, humedad, entre otros, para realizar simulaciones hidrológicas detalladas(Cho and Kim 2022).

Análisis de escenarios climáticos: Facilita la evaluación de diferentes escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo para entender su impacto en el ciclo hidrológico de la cuenca(Cho and Kim 2022).

Aplicaciones del WRF-Hydro:

El WRF-Hydro se utiliza en la predicción de inundaciones, gestión de recursos hídricos, estudios de impacto ambiental y en la planificación del uso del agua. Su capacidad para integrar datos meteorológicos y simular el

comportamiento del agua en la cuenca lo convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la mitigación de riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos(Cho and Kim 2022).

2.9. DISCRETIZACIÓN

La discretización en hidrología se refiere a la transformación de fenómenos continuos del ciclo hidrológico, como precipitaciones, escorrentía y evaporación, en formas discretas o segmentadas. Este proceso permite el análisis y la simulación de estos eventos en intervalos o unidades definidas, siendo esencial para su estudio y modelización(Liu et al. 2023).

La discretización climática

Es un proceso en modelos hidrológicos que implica dividir una cuenca en zonas climáticas distintas. Esta técnica reconoce las variaciones en las condiciones meteorológicas dentro de la cuenca, permitiendo una representación más detallada de la influencia del clima en los procesos hidrológicos. Cada zona climática puede caracterizarse por patrones climáticos específicos, como precipitación y temperatura, lo que facilita la consideración de la variabilidad espacial en la simulación de la respuesta hidrológica. (Macor and Pedraza 2006).

La discretización de la precipitación

Proceso que implica subdividir una región o cuenca en unidades más pequeñas para representar de manera detallada las variaciones espaciales de las precipitaciones. Esta técnica reconoce que la precipitación no es uniforme en toda el área de estudio y permite capturar patrones locales. Mediante la implementación de estaciones meteorológicas distribuidas estratégicamente o el uso de datos de satélites, se puede

obtener una representación más precisa de la distribución espacial de las precipitaciones (Macor and Pedraza 2006).

La discretización de parámetros hidrológicos

Implica la subdivisión de una cuenca en segmentos específicos para considerar variaciones espaciales en las características del terreno y del suelo. Este proceso identifica regiones con propiedades hidráulicas distintas, como la infiltración y la retención de agua, permitiendo una representación más precisa de los procesos hidrológicos (Macor and Pedraza 2006).

Fundamentos y objetivos

El propósito fundamental de la discretización en hidrología es convertir fenómenos continuos en elementos discretos para poder aplicar modelos matemáticos y simular el comportamiento hidrológico en escalas específicas. Busca representar adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de los procesos hidrológicos (Liu et al. 2023).

Relevancia en la modelización hidrológica

La precisión y validez de los modelos hidrológicos dependen en gran medida de cómo se discretizan las variables y los procesos, ya que esto impacta directamente en la capacidad predictiva y en la comprensión de la hidrología de una cuenca (Tian et al. 2018).

2.10. TIPOS DE DISCRETIZACIÓN

2.10.1. Discretización espacial en cuencas hidrográficas

La discretización espacial implica la subdivisión de la cuenca hidrográfica en elementos discretos, como celdas o subcuencas, para representar la variabilidad geográfica de los procesos hidrológicos. La resolución espacial y la



representatividad de la cuenca son fundamentales para capturar adecuadamente la heterogeneidad del terreno y los flujos hidrológicos(Gu et al. 2020).

2.10.2. Subdivisión de la Cuenca en elementos discretos

Esta subdivisión puede realizarse mediante técnicas de rejilla regular, que dividen la cuenca en una malla uniforme, o mediante enfoques de subdivisión irregular adaptativa, que se ajustan a la variabilidad geográfica y geomorfológica de la cuenca(Jeziorska 2019).

2.10.3. Resolución espacial y representatividad de la Cuenca

La elección de la resolución espacial debe considerar la escala de los fenómenos hidrológicos que se están estudiando. Una resolución fina captura mejor la variabilidad, pero aumenta la complejidad computacional (Jeziorska 2019).

2.10.4. Discretización temporal en modelos hidrológicos

La discretización temporal implica la división de datos y procesos hidrológicos en intervalos temporales discretos, como horas, días o meses, para modelar el comportamiento hidrológico en diferentes momentos (Jeziorska 2019).

2.10.5. División temporal de datos y procesos hidrológicos

La elección del intervalo de tiempo tiene un impacto significativo en la precisión de los modelos. Los intervalos cortos pueden capturar cambios rápidos, pero aumentan la carga computacional, mientras que intervalos más largos pueden perder detalles importantes (Jeziorska 2019).



2.10.6. Importancia de la resolución temporal en la precisión

La resolución temporal influye en la precisión de la representación de eventos hidrológicos como tormentas, sequías y patrones estacionales, afectando directamente la calidad de las predicciones (Jeziorska 2019).

2.11. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.11.1. Antecedentes Internacionales

Shekar et al., (2023) la investigación se enfocó en evaluar la precisión de varios modelos, incluido el modelo SWAT y ocho modelos de inteligencia artificial (IA), para simular el proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Murredu. Se emplearon dos enfoques de modelización: el modelo SWAT y ocho modelos de IA, que incluyeron siete enfoques basados en datos (regresión k-próximo más cercano, regresión vectorial de soporte, regresión lineal, redes neuronales artificiales, regresión de bosque aleatorio, XGBoost y regresión Histogram-based Gradient Boost) junto con un modelo de aprendizaje profundo conocido como memoria a largo plazo (LSTM). El estudio se centró en la modelización de caudales mensuales en la cuenca del río Murredu, abarcando periodos de calibración (1999-2003) y validación (2004-2005). Los nueve modelos demostraron ser aptos para simular el proceso lluvia-escorrentía. El modelo LSTM destacó con un rendimiento excepcional en calibración (R^2 de 0,97 y NSE de 0,96) y validación (R^2 de 0,97 y NSE de 0,92), evidenciando su capacidad superior para representar con precisión la relación lluvia-escorrentía. Aunque los otros modelos arrojaron resultados satisfactorios, el LSTM mostró un rendimiento destacado. Se concluyó que la selección de un modelo eficiente, como el LSTM, podría contribuir significativamente a la gestión y planificación efectivas de recursos hídricos sostenibles en la cuenca de Murredu. Su capacidad



excepcional para modelar la relación lluvia-escorrentía sugiere su potencial relevancia en la gestión de cuencas hidrográficas y el manejo de recursos hídricos en áreas similares.

Natumanya et al., 2022) el objetivo de este estudio era evaluar la viabilidad de emplear datos de precipitación remota de NASA-POWER y datos de suelo y cobertura de tierras de la FAO para modelar la relación entre la lluvia y la escorrentía en la cuenca del río Incalaue, ubicada en la Reserva Especial de Niassa (NSR) en el noreste de Mozambique. Para realizar el análisis, se utilizaron datos de modelos digitales de elevación (DEM) con resolución de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ y escala 1:250,000 descargados del sitio web de USGS. También se emplearon mapas digitales de suelo y cobertura de tierras de la FAO, datos recolectados en campo y el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para evaluar la relación entre la lluvia y la escorrentía. Se compararon los datos de suelo de la FAO, ampliamente utilizados en la región, con los datos recopilados en el área de estudio. Los resultados mostraron que el modelo SWAT logró una sólida correlación entre la lluvia y la escorrentía utilizando los datos de NASA-POWER para el período estudiado (2019-2021), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.7749. Esta correlación se encontró igualmente fuerte en los datos medidos en campo ($R^2 = 0.8131$). Los datos meteorológicos de NASA-POWER exhibieron tendencias consistentes en la lluvia, temperatura y humedad relativa. Los residentes confirmaron la temporalidad de los eventos de lluvia y caudal observados en el modelo, validando su precisión. En conclusión este estudio demostró que los datos de NASA-POWER tienen potencial para modelar la relación entre la lluvia y la escorrentía en la cuenca estudiada. Sin embargo, algunas discrepancias entre los datos del modelo y los recopilados en campo



podrían deberse a características específicas del paisaje o a detalles en la capa superficial del suelo no considerados en los datos de la FAO.

Jaberzadeh et al., (2022) al evaluar la capacidad de los modelos hidrológicos SWAT e IHACRES para simular la escorrentía en la cuenca del río Dez en Irán utilizando datos climáticos del centro NCEP CFSR, con el propósito de aplicar medidas preventivas para eventos como inundaciones. Se recopilaron datos meteorológicos esenciales del centro NCEP CFSR para modelar la escorrentía en la cuenca del río Dez durante un período de 20 años. Se emplearon los modelos SWAT e IHACRES "(Identification of Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data)". para la simulación hidrológica, y se utilizó el software SWAT-CUP para optimizar y calibrar los modelos. Se evaluó la capacidad de los modelos utilizando coeficientes de determinación y eficiencia de Nash-Sutcliffe. El modelo SWAT demostró un rendimiento superior al IHACRES al emplear la base de datos climáticos del centro NCEP CFSR. Los valores de coeficiente de determinación y eficiencia de Nash-Sutcliffe fueron más altos para SWAT en comparación con IHACRES en los períodos de calibración y validación. Ambos modelos mostraron una capacidad razonable para simular la escorrentía en la cuenca del río Dez, con ciertas diferencias en su rendimiento. En conclusión, los resultados indican que el modelo SWAT, utilizando datos climáticos del centro NCEP CFSR, es más eficiente para simular la escorrentía en la cuenca del río Dez que el modelo IHACRES. Sin embargo, ambos modelos ofrecen una simulación razonable de la escorrentía, lo que sugiere su utilidad para la predicción de eventos hidrológicos en la región y la adopción de medidas preventivas, especialmente en situaciones de escasez de datos observacionales.



(Kim and Kim 2021), en su estudio se enfocó en analizar la lluvia-escorrentía en la cuenca del río Yeongsan, utilizando métodos convencionales de modelos hidrológicos y un enfoque de aprendizaje profundo. Se empleó el modelo hidrológico SWAT y una red LSTM para el análisis. Se consideraron las interacciones complejas del ciclo hidrológico, y se evaluaron el coeficiente de correlación y la eficiencia de Nash-Sutcliffe como indicadores de rendimiento del modelo. La red LSTM mostró un desempeño superior, evidenciado por un mayor coeficiente de correlación y eficiencia de Nash-Sutcliffe en comparación con el modelo hidrológico convencional. Se observó que la LSTM tenía un mejor rendimiento con un período de calibración más largo. Se concluyó que un enfoque basado en datos como la red LSTM puede ser más efectivo que los modelos hidrológicos convencionales en cuencas con datos históricos hidrológicos, pero sin la diversidad de información topográfica y meteorológica requerida por estos últimos.

Karki, (2020) evaluó el rendimiento del Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular la escorrentía en la Cuenca Kankai en Nepal. Se busca determinar su viabilidad para estimar la lluvia-escorrentía en esta área principalmente agrícola. Se utilizó el Modelo SWAT para simular la lluvia-escorrentía en la Cuenca Kankai, abarcando 1165 kilómetros cuadrados. Se emplearon diversas técnicas y métodos como la hidrografía unitaria Clark, pérdida constante por déficit, flujo base mensual, enrutamiento de flujo Muskingum, y evapotranspiración mensual. Se ajustaron parámetros clave como tasa de infiltración y tiempo de concentración para calibrar el modelo. Los datos diarios de 1986 a 1989 se utilizaron para esta fase, evaluando la precisión mediante eficiencias como Nash-Sutcliffe. Durante el período de calibración, la eficiencia



de Nash-Sutcliffe alcanzó 0.87, aunque se observó una sobreestimación en caudales altos y una subestimación en caudales bajos. La validación (1990-2011) mostró una eficiencia de 0.79, con una tendencia similar. Las estadísticas de regresión evidenciaron un alto ajuste del modelo a los datos observados. El estudio de sensibilidad identificó los parámetros clave para la generación de flujo. En conclusión, el Modelo SWAT demostró una buena capacidad para simular el caudal en la Cuenca Kankai, siendo útil para la estimación de la escorrentía en esta cuenca agrícola. A pesar de algunas discrepancias en ciertos caudales, su desempeño general permite su aplicación en la gestión y planificación de recursos hídricos en esta cuenca y otras áreas de la región.

Fereidoon et al., (2019) el estudio pretendió evaluar la eficacia de métodos de estimación de precipitación, particularmente el algoritmo SM2RAIN, empleando datos de humedad del suelo derivados de un satélite para luego simular la escorrentía en una cuenca hidrográfica. Se utilizó el algoritmo SM2RAIN con datos de humedad del suelo del Radiómetro Avanzado de Barrido por Microondas (AMSR-E) para calcular la precipitación diaria (SM2R-AMSRE) en la cuenca del río Karkheh. Posteriormente, se aplicó el modelo hidrológico SWAT usando datos de precipitación terrestre y SM2R-AMSRE para simular la escorrentía en la misma cuenca. Los datos estimados de precipitación SM2R-AMSRE mostraron una concordancia aceptable con los datos observados en tierra, con correlaciones entre 0.58 y 0.88. No obstante, hubo una subestimación de las precipitaciones observadas debido a la saturación del suelo, no considerada en la ecuación del SM2RAIN. La simulación de escorrentía mensual con el modelo SWAT basado en los datos de precipitación SM2R-AMSRE se ajustó a las observaciones en seis estaciones de medición ($R^2 > 0.71$ y $NSE > 0.56$), pero presentó cierto sesgo y



errores medios cuadráticos más altos en comparación con el modelo SWAT que utilizó datos de precipitación terrestre. Se compararon también estimaciones de precipitación de dos productos satelitales, TRMM 3B42 y 3B42RT, obteniendo resultados ligeramente mejores con 3B42 en términos de R² y NSE, aunque inferiores a SWAT-SM2R-AMSRE. En conclusión, a pesar de ciertas limitaciones, el uso de datos pluviométricos SM2R-AMSRE parece ser una opción viable en cuencas con escasa información de datos pluviométricos terrestres para aplicaciones hidrológicas, ofreciendo una alternativa para estimar la precipitación y simular la escorrentía en ausencia de mediciones terrestres extensas.

Rohtash et al., (2019) el objetivo de este estudio fue modelar la relación entre la precipitación y la escorrentía en la cuenca del río Chaliyar en Kuniyil utilizando el modelo hidrológico SWAT. Se buscaba comprender cómo la precipitación se convertía en escorrentía y evaluar la eficacia del modelo para estimar este proceso en una cuenca específica. La metodología empleada consistió en la aplicación del modelo SWAT para simular la escorrentía en la cuenca del río Chaliyar en Kuniyil, que se dividió. Se llevó a cabo un análisis de tendencia de precipitación en cuatro estaciones diferentes durante el período de 1991 a 2011. Se evaluaron factores clave como la distribución de la precipitación, la topografía y los tipos de suelo para comprender su influencia en la escorrentía. El modelo SWAT demostró una eficacia razonable, con un coeficiente de determinación (R²) de 0.69 para estimar la escorrentía en la cuenca. Tras la calibración y validación con SWAT-CUP, se obtuvieron resultados satisfactorios, con coeficientes de determinación y eficiencia de Nash-Sutcliffe del 0.77% y 0.75% para la calibración, y 0.77% y 0.73%, respectivamente, para la validación. En conclusión,



el modelo hidrológico SWAT aplicado en la cuenca del río Chaliyar en Kuniyil demostró ser una herramienta efectiva para estimar la relación entre precipitación y escorrentía. A pesar de los cambios insignificantes en las tendencias de precipitación, el modelo proporcionó resultados satisfactorios en la estimación de la escorrentía en la cuenca, subrayando su utilidad en la gestión hídrica y la predicción de caudales en áreas similares.

Kerala et al., (2018) propone evaluar la eficacia de los métodos de Número de Curva (CN) y Green y Ampt (G&A) en el modelo SWAT, analizando su desempeño en la predicción lluvia-escorrentía. El objetivo es entender cómo las incertidumbres en la modelización afectan los balances hidrológicos y los caudales en distintas escalas y condiciones de uso del suelo. Se adoptó un enfoque probabilístico basado en un marco bayesiano para evaluar la incertidumbre total en el modelo SWAT. Este análisis consideró las incertidumbres en parámetros, entradas, estructura y datos del modelo. Se utilizó este enfoque para simular caudales con diferentes métodos lluvia-escorrentía en una cuenca de uso mixto del suelo. A pesar de entrenar los modelos solo para la salida de la cuenca, se compararon los resultados en diferentes puntos de esta. El método CN mostró un ligero rendimiento superior en la salida de la cuenca, aunque no fue significativo estadísticamente. Esta tendencia se observó en afluentes forestales y agrícolas, pero el método G&A superó al CN en afluentes con zonas urbanizadas. Los intervalos de predicción del 95% del G&A cubrieron un mayor porcentaje del caudal observado, especialmente en eventos de caudal alto, aunque fueron más amplios que los del CN. Estos hallazgos sugieren que, aunque el CN y el G&A tuvieron resultados similares en la salida de la cuenca, el método G&A capturó de manera más precisa los procesos internos. En conclusión, los resultados subrayan



la relevancia de seleccionar métodos adecuados de lluvia-escorrentía, particularmente en cuencas con diversos usos del suelo. Indican que, aunque el CN y el G&A mostraron desempeños comparables en la salida de la cuenca, el método G&A representó con mayor fidelidad los procesos internos. Esta precisión podría tener implicaciones significativas en la representación de procesos hidrológicos y balances en modelos hidrológicos complejos.

2.11.2. Antecedentes Nacionales

Cabrera, E. (2022) Analizó el impacto de la pérdida de cobertura vegetal en la variación del caudal de escorrentía de una cuenca hidrográfica. Se llevó a cabo una investigación cualitativa con enfoque descriptivo y diseño no experimental. Se recopiló datos de bases como Web of Science, Dialnet, Scielo y Scopus desde 2018 hasta 2021. Se revisaron factores antrópicos y naturales que afectan la cobertura vegetal y su relación con la infiltración y la escorrentía. Se identificaron modelos hidrológicos como SWAT y HEC HMS para la modelación de la relación entre precipitación y escorrentía. Los hallazgos revelaron que factores antrópicos y naturales inciden en la composición y estructura de la cobertura vegetal. Se constató una correlación directa entre la vegetación, la infiltración y la escorrentía. Se destacó la existencia de modelos como SWAT y HEC HMS para modelar la relación entre la lluvia y la escorrentía. En conclusión, la pérdida de cobertura vegetal impacta significativamente en la variación del caudal de escorrentía. Los modelos hidrológicos como SWAT y HEC HMS se presentan como herramientas cruciales para comprender la relación entre la precipitación y la escorrentía en este contexto.

(Centeno, T. 2022b) evaluó el desempeño del modelo SWAT utilizando el producto de datos PISCO en la modelización hidrológica para la cuenca del río



Ramis, en la región del Altiplano de Perú, y analizar su capacidad para simular la escorrentía. Se realizó un análisis exploratorio de los datos hidrológicos y se utilizaron datos de precipitación y temperatura del producto PISCO para la modelización. Se configuró el modelo SWAT, se definieron las subcuencas y la red de flujo con datos de elevación digital, y se estimó la evapotranspiración potencial y la escorrentía superficial. Se calibró y validó el modelo ajustando 20 parámetros durante distintos periodos de tiempo. Los análisis diarios mostraron un buen rendimiento tanto en la calibración como en la validación, con estadísticas de eficiencia NSE de 0.72 y 0.69, y PBIAS de -8.9% y 2.2%. A nivel mensual, los resultados también fueron satisfactorios, con NSE de 0.78 y 0.77, y PBIAS de -18.7% y 5.3%, respectivamente. En conclusiones los resultados indican un desempeño satisfactorio a muy bueno del modelo SWAT al utilizar el producto PISCO como insumo en la modelización hidrológica para la cuenca del río Ramis. Esto muestra una prometedora capacidad de simulación de la escorrentía, lo que resalta el potencial de PISCO como herramienta fundamental para la gestión y planificación de recursos hídricos en la región.

Quezada, Y. (2021) el propósito central de este estudio fue evaluar el impacto del cambio climático proyectado para el año 2050 en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Moche, utilizando el modelo hidrológico SWAT como herramienta principal. La investigación se basó en el empleo del modelo SWAT, que requirió datos sobre la geomorfología de la cuenca, así como registros de temperatura y precipitación. El modelo se calibró y validó utilizando datos de caudales mensuales de la estación hidrológica Quirhuac, abarcando un periodo de 16 años (1999-2014). Para evaluar el posible cambio climático para el año 2050, se utilizaron dos modelos climáticos (MIROC-5 y MIROC-ESM) con dos



escenarios de emisión (RCP4.5 y 8.5) obtenidos del generador climático Marksim. Se observó un aumento proyectado en las temperaturas, con incrementos entre 0.4°C y 0.7°C en todos los escenarios analizados. En cuanto a la precipitación, se detectó una disminución que varió entre 19.26% y 1.1% en todos los escenarios evaluados. Respecto a la escorrentía superficial, se registraron reducciones en todos los escenarios, a excepción del escenario MIROC-ESM RCP 4.5, donde se identificó un aumento del 2.2% en la escorrentía. En conclusión, el análisis hidrológico reveló una tendencia generalizada hacia la disminución de la precipitación y la escorrentía superficial bajo los diferentes escenarios de cambio climático evaluados. Estos resultados sugieren un posible escenario para el año 2050, caracterizado por menores cantidades de precipitación y escorrentía, acompañado por un incremento en las temperaturas.

Jiménez, A. (2021) con el objetivo de realizar una simulación hidrológica diaria en la cuenca del río Tambo, situado en el sur del Perú. Se buscó comprender la disponibilidad de agua en diferentes áreas de la cuenca y analizar su variabilidad a lo largo de cuatro décadas, tanto en términos hidrológicos como climáticos. Se empleó el modelo hidrológico SWAT, el cual utiliza datos de suelo, cobertura vegetal, modelo digital de elevación y datos climáticos. La calibración y validación del modelo se llevaron a cabo mediante estadísticas como Nash, PBIAS, RSR y R2. Se logró la simulación de caudales en 55 subcuencas, eligiendo tres de ellas (alta, media y baja) para analizar la disponibilidad hídrica. Se encontraron los mayores valores de precipitación, evapotranspiración, flujo base y escorrentía superficial en la zona alta de la cuenca, con una disminución gradual de estos valores hacia las zonas más bajas. Se compararon eventos extremos entre décadas y se evaluó la persistencia del 75% a través de curvas de duración de



caudales. Se analizó la variabilidad climática con 27 índices recomendados y la variabilidad hidrológica con dos índices adaptados para caudales en las diferentes zonas de la cuenca. En conclusión, el estudio revela un aumento constante de las temperaturas a lo largo de las décadas, aunque no se encontraron cambios significativos en las precipitaciones. Se observó una disminución en los caudales durante la época de estiaje después de la puesta en marcha del embalse Pasto Grande, indicando un impacto en la disponibilidad de agua en esta época del año.

Del Aguila, S. (2021), el propósito principal de esta investigación fue modelar los procesos hidrológicos en las cuencas de Anya y Mchique, integrantes de la cuenca del río Mantaro en Junín, como parte esencial de la gestión del recurso hídrico en las zonas de cabecera de la sierra central del Perú. Se emplearon dos modelos para generar escurrimiento: el modelo empírico mensual Lutz Scholtz (LS) y el modelo semidistribuido diario SWAT. Se propuso una modificación al modelo LS para calcular la Precipitación Efectiva mensual mediante la metodología de la Curva Número con herramientas de ArGis y HecGeoHms 10.4. En Anya, los indicadores de desempeño fueron positivos para los tres modelos, destacando mejoras significativas con los modelos SWAT y LSM. En Mchique, se obtuvo un 66.7% de indicadores satisfactorios en todos los modelos evaluados. Además, se analizó el impacto del cambio climático en el escurrimiento de ambas cuencas mediante cinco modelos climáticos globales y dos escenarios de emisiones. La proyección para el período 2070-2100 indicó un aumento promedio del 29.4% y 34.1% en Anya, y del 5.4% y 10.8% en Mchique, en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 respectivamente, en comparación con el periodo base 1980-2010. En conclusión, esta investigación resalta la importancia del modelado hidrológico para la gestión del recurso hídrico en zonas de cabecera. La adaptación del modelo



LS (LSM) permitió una mejor comprensión de los procesos al considerar las particularidades del suelo y la cobertura vegetal. Los modelos SWAT y LSM demostraron ser más efectivos en la estimación de la escorrentía. Las proyecciones sugieren un aumento en los caudales en ambas cuencas para finales del siglo XXI, como resultado del cambio climático, lo que subraya la necesidad de medidas adaptativas para la gestión futura de estos recursos.

León, R. (2017) ,el objetivo fue analizar el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca media y alta del río Piura hacia mediados del siglo XXI, utilizando el modelo hidrológico SWAT y considerando escenarios climáticos derivados de diferentes modelos globales y niveles de emisiones de gases de efecto invernadero. Se empleó el modelo SWAT, calibrado y validado para el periodo 1986-2008, con buen desempeño según valores de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficientes de determinación (R^2) superiores al 75%. Se proyectaron variables climáticas mediante dos escenarios de forzamiento radiactivo (RCP4.5 y RCP8.5) utilizando dos modelos climáticos globales (HADGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0 del CMIP5), generando cuatro escenarios futuros. Se analizaron periodos húmedos, secos y anuales. Se proyectó un aumento promedio del +71.8% en la escorrentía durante el periodo húmedo, equivalente a unos 55.9 m³/s, con incrementos notables en octubre, noviembre y diciembre. Conclusiones: El estudio destaca la proyección de cambios significativos en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Piura hacia mediados del siglo XXI. Muestra un probable aumento sustancial durante los periodos húmedos y una disminución significativa durante los periodos secos. Estas proyecciones subrayan la necesidad de estrategias adaptativas para gestionar el recurso hídrico en esta región en respuesta a los cambios climáticos futuros.



2.11.3. Antecedentes Regionales

Centeno, T. (2022b), con el propósito de realizar la modelización hidrológica en la cuenca del río Ramis, ubicada en el Altiplano peruano, utilizando el modelo SWAT con la base de datos PISCO. Se llevó a cabo un análisis exploratorio de la información hidrológica, incluyendo la determinación de la evapotranspiración potencial y la modelización hidrológica con los datos proporcionados por PISCO. Se configuró y parametrizó el modelo SWAT, delimitando las subcuencas y la red de flujo mediante datos del Modelo Digital de Elevación (MDE). Se definieron las Unidades Hidrológicas de Representación (HRU) a partir de la combinación de información de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente. Durante la calibración y validación del modelo, ajustando 20 parámetros y utilizando diferentes periodos (NYSKIP, calibración y validación), se obtuvieron resultados satisfactorios y muy buenos. Los valores de eficiencia, evaluados a nivel diario y mensual mediante las estadísticas NSE y PBIAS, mostraron rendimientos positivos, como NSE de 0.72 y 0.69 en la calibración y NSE de 0.78 y 0.77 en la validación a nivel mensual. Los porcentajes de PBIAS también reflejaron buenos resultados, con valores de -8.9% y 2.2% en la calibración, y -18.7% y 5.3% en la validación, respectivamente. Conclusiones los resultados obtenidos indican que el producto PISCO demostró ser una herramienta confiable y prometedora para la modelización hidrológica en la cuenca del río Ramis.

Quiñonez, C. (2022), tuvo el propósito de generar estimaciones precisas de caudales máximos a partir de datos de precipitación detallada y con alta resolución espacial para la cuenca Ilave. Se extrajo información del Sistema de Pronóstico Global (GFS) para su procesamiento en el Modelo de Pronóstico e Investigación



Meteorológica (WRF), generando datos de precipitación máxima a nivel horario. Estos resultados se validaron con parámetros estadísticos como el error cuadrático medio (RSME), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo (BIAS) en seis puntos de validación, demostrando su alta significancia. Utilizando las predicciones de precipitación máxima del modelo WRF, se determinaron los caudales máximos mediante el software hidrológico "HEC-HMS". Estos resultados también se validaron utilizando criterios como el de Schultz (D), desviación media acumulada (MAD), eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) y raíz del error cuadrático medio (RSME). La modelación hidrológica arrojó caudales máximos estimados de 558.3 m³/s a partir de las proyecciones de precipitación máxima obtenidas con el modelo WRF. Este modelo fue calibrado y validado, obteniendo resultados altamente satisfactorios y significativos según los parámetros de evaluación utilizados. Conclusiones los resultados obtenidos de esta modelización hidrológica proveen datos confiables y precisos sobre los caudales máximos en la cuenca Ilave. Estos datos son fundamentales para la gestión de riesgos asociados a posibles inundaciones, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en la prevención y mitigación de estos eventos.

Condori, Y. (2020), tuvo como propósito principal fue estimar los caudales medios mensuales para la subcuenca del río Cañipia, empleando las características hidrológicas de la cuenca alta del río Apurímac. Se emplearon los modelos hidrológicos GR2M y Lutz Scholz. Se analizaron las series históricas de datos y se evaluó la eficiencia del modelo GR2M en la cuenca alta del río Apurímac mediante el estadístico Nash-Sutcliffe en la etapa de calibración y validación. Se compararon los caudales simulados y observados en la subcuenca del río Cañipia durante el periodo de estudio (2010-2018). Además, se identificó la sensibilidad



de ciertos parámetros del modelo. Se encontró una ausencia de cambios bruscos o tendencias evidentes en las series históricas. La evaluación del modelo GR2M en la cuenca alta del río Apurímac mostró eficiencias del 84.6% en la calibración y del 84.3% en la validación. La comparación entre los caudales simulados y observados reveló algunas discrepancias, principalmente debido a la naturaleza de los caudales observados, medidos mensualmente. Se identificó la sensibilidad del parámetro X1 en el modelo. Conclusiones: Ambos modelos hidrológicos, GR2M y Lutz Scholz, demostraron un buen desempeño en generación de caudales medios mensuales. La correlación de los caudales generados por el modelo GR2M con los observados en la cuenca alta del río Apurímac alcanzó un valor de $R^2 = 0.779287$, aproximándose al valor máximo de 1.

Zapana, J. (2019) con el propósito de evaluar el impacto de la precipitación grillada PISCO en la respuesta hidrológica de la cuenca Huancané, utilizando el modelo semidistribuido SWAT. Se calibró y validó el modelo SWAT utilizando datos de precipitación histórica (1984-2016) y ajustando 4 parámetros clave. Se establecieron dos escenarios de distribución con precipitación grillada: uno manteniendo la ubicación en estaciones de observación y otro utilizando estaciones sintéticas. Estos escenarios se evaluaron durante periodos de calibración y validación mediante análisis gráficos y estadísticos. La calibración y validación del modelo mostraron una eficiencia aceptable, con estadísticas como NSE y PBIAS indicando buenos niveles de ajuste a escala diaria y mensual. Los dos escenarios de distribución con PISCO revelaron capacidades distintas: el primero mantuvo estadísticas positivas, mostrando una alta eficiencia, mientras que el segundo, utilizando estaciones sintéticas, presentó métricas de eficiencia ligeramente más bajas. Conclusiones la incidencia estacional y espacial de los



componentes del balance hídrico sugiere una estacionalidad mensual similar y la influencia del acuífero profundo en el flujo subterráneo. Esto podría explicar cierta sobrevaloración, especialmente en épocas de crecida.

Laura, J. (2019), con el objetivo de evaluar el impacto del aumento de la temperatura global en el ciclo hidrológico, particularmente en los componentes del balance hídrico de la cuenca del río Ilave. Se realizó una evaluación detallada utilizando el modelo hidrológico SAC-SMA para representar los caudales a escala diaria en tres períodos temporales: histórico, presente y futuro. Se calibró y validó el modelo durante el período actual, mientras que, para proyectar el clima futuro, se emplearon 21 GCMs de la base de datos NEX-GDDP de la NASA. Se utilizó el modelo CESM1-BGC, el cual se corrigió a través de funciones de transferencia mensuales para cada estación de la cuenca. Al evaluar los GCMs, el CESM1-BGC mostró el mejor rendimiento en la representación de las estadísticas de precipitación y temperatura. Se proyectaron dos escenarios de futuro (RCP4.5 y RCP8.5) para períodos cercanos y lejanos, revelando que, en general, la disponibilidad anual de agua se reduciría en comparación con el período histórico, excepto en un escenario del futuro lejano (RCP 8.5), donde se esperaba un aumento significativo. Conclusiones los resultados indican que habrá variaciones importantes en la disponibilidad de agua a lo largo del tiempo. Se prevé una disminución anual de caudales en la mayoría de los escenarios estudiados, excepto en condiciones extremas. Las fluctuaciones mensuales y estacionales también serán significativas, lo que podría impactar en la gestión de recursos hídricos y en el comportamiento de los caudales.

Palomino, R. (2017) este estudio se enfoca en la subcuenca Bajo Huancané, dentro de la cuenca Huancané en la Región Puno. Su propósito es



evaluar las inundaciones recurrentes en la parte baja del río Huancané. El estudio se llevó a cabo empleando diversas herramientas y enfoques. Se incluyó la aplicación de teorías hidrológicas como el ciclo del agua, hidrogramas de tormentas, análisis estadístico, y se utilizaron programas especializados como HEC-HMS y HEC-RAS para realizar la modelación hidrológica e hidráulica. Se evaluaron las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, se calcularon caudales máximos, volúmenes medios por mes y se realizaron cálculos del balance hídrico. También se utilizaron guías y manuales del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) para evaluar los riesgos de inundaciones en la zona. Se obtuvieron datos relevantes sobre las precipitaciones máximas con diferentes periodos de retorno a partir de la información recopilada de 12 estaciones meteorológicas. Se calcularon caudales y volúmenes medios por mes, y se generaron mapas de riesgo de inundaciones utilizando el programa HEC-RAS junto con las directrices del INDECI. Además, se desarrolló un Balance Hídrico para comprender el potencial de agua superficial en la subcuenca. En conclusión, se proporcionó información valiosa sobre las precipitaciones y caudales máximos, así como sobre los riesgos de inundaciones en la subcuenca Bajo Huancané. Esto puede ser crucial para comprender y abordar las inundaciones recurrentes en esta región.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

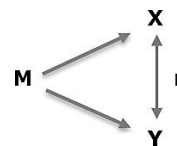
Investigación Cuantitativa: Este enfoque se centra en la recopilación y el análisis de datos numéricos y cuantificables. En este estudio hidrológico, se emplearon datos climáticos, mediciones hidrológicas y modelos matemáticos para analizar la precipitación relacionado a la escorrentía.

3.1.2. Diseño del estudio

Descriptivo: El enfoque descriptivo busca describir características, fenómenos o relaciones presentes en una situación específica. En este caso, se describe y analiza la precipitación y escorrentía en la Cuenca del río Coata mediante modelos hidrológicos y datos observados.

Y: Variable Precipitación

X: Variable Escorrentía



r: Relación entre las dos variables

3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO

Se realizó en la Cuenca del río Coata y sus alrededores, considerando la extensión geográfica de esta cuenca, sus límites, topografía, usos del suelo y distribución espacial de la precipitación.

El río Coata es un río afluente del lago Titicaca que recorre por territorio peruano. Cuenta con una cuenca hidrográfica que abarca los 4 585 km². Ubicación política de la cuenca alta del río Coata:



Área de estudio se localiza en la unidad morfoestructural denominada Altiplano, en el sur del Perú, perteneciente políticamente a la Región Puno. Se extiende por las provincias de Lampa, San Román y Puno, así como por los distritos de Vila Vila, Palca, Lampa, Cabanilla, Juliaca, Caracoto y Coata. Esta zona alberga la Cuenca del Río Coata, desde su origen en la parte alta hasta su desembocadura en el Lago Titicaca (Sociedad Geológica del Perú, 2021).

3.2.1. Ubicación Geográfica:

La cuenca del Río Coata abarca una extensión geográfica situada entre los paralelos 15° 6' y 15° 55' de Latitud Sur, y entre los meridianos 69° 54' y 71° 12' de Longitud Oeste (Sociedad Geológica del Perú, 2021).

3.2.2. Ubicación Hidrográfica:

Desde el punto de vista hidrográfico, la Cuenca del Río Coata comparte límites con otras cuencas de la siguiente manera:

Hacia el norte: Cuenca Pucará.

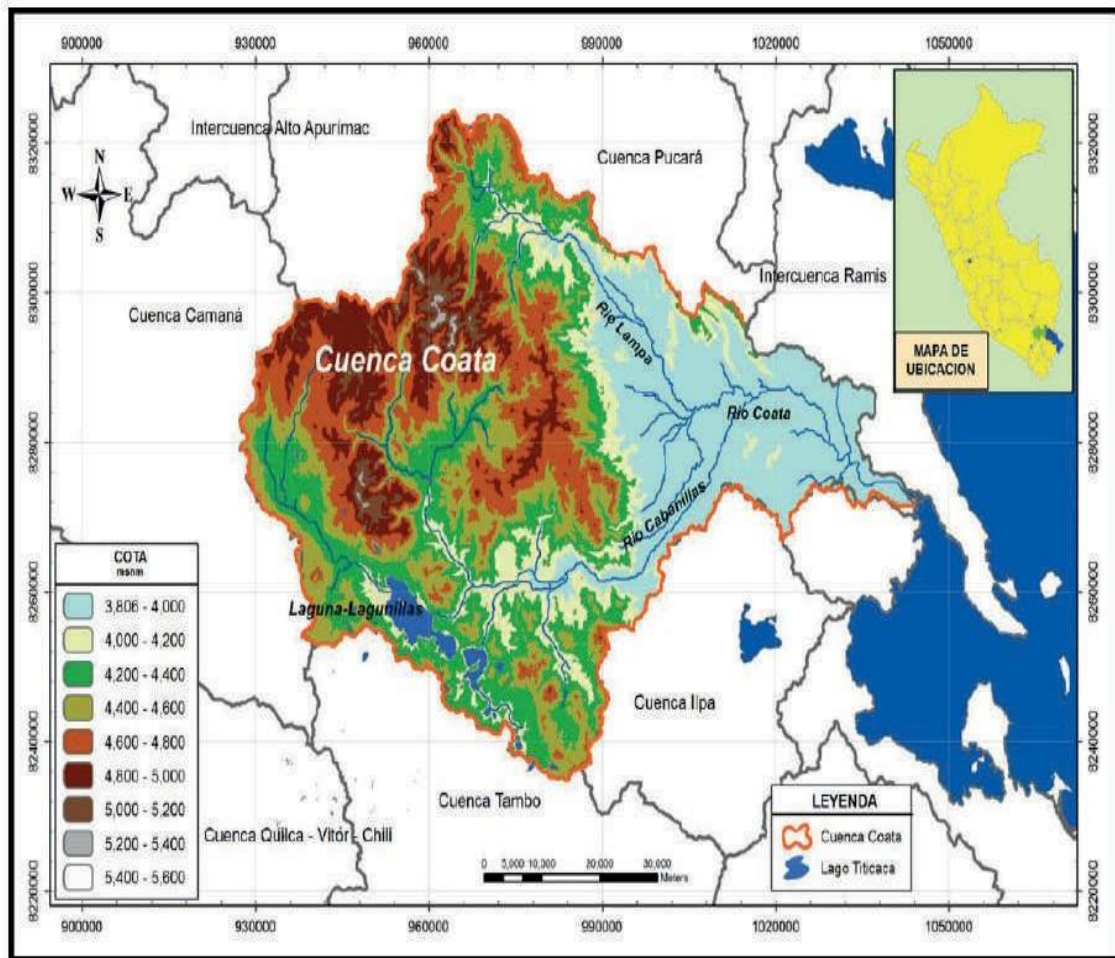
Hacia el sur: Cuencas Tambo e Illpa.

Hacia el este: Inter cuenca Ramis.

Hacia el oeste: Cuenca Camaná (Sociedad Geológica del Perú 2021).

Figura 7

Ubicación Hidrográfica de la Cuenca del Río Coata



Fuente:(Sociedad Geológica del Perú 2021)

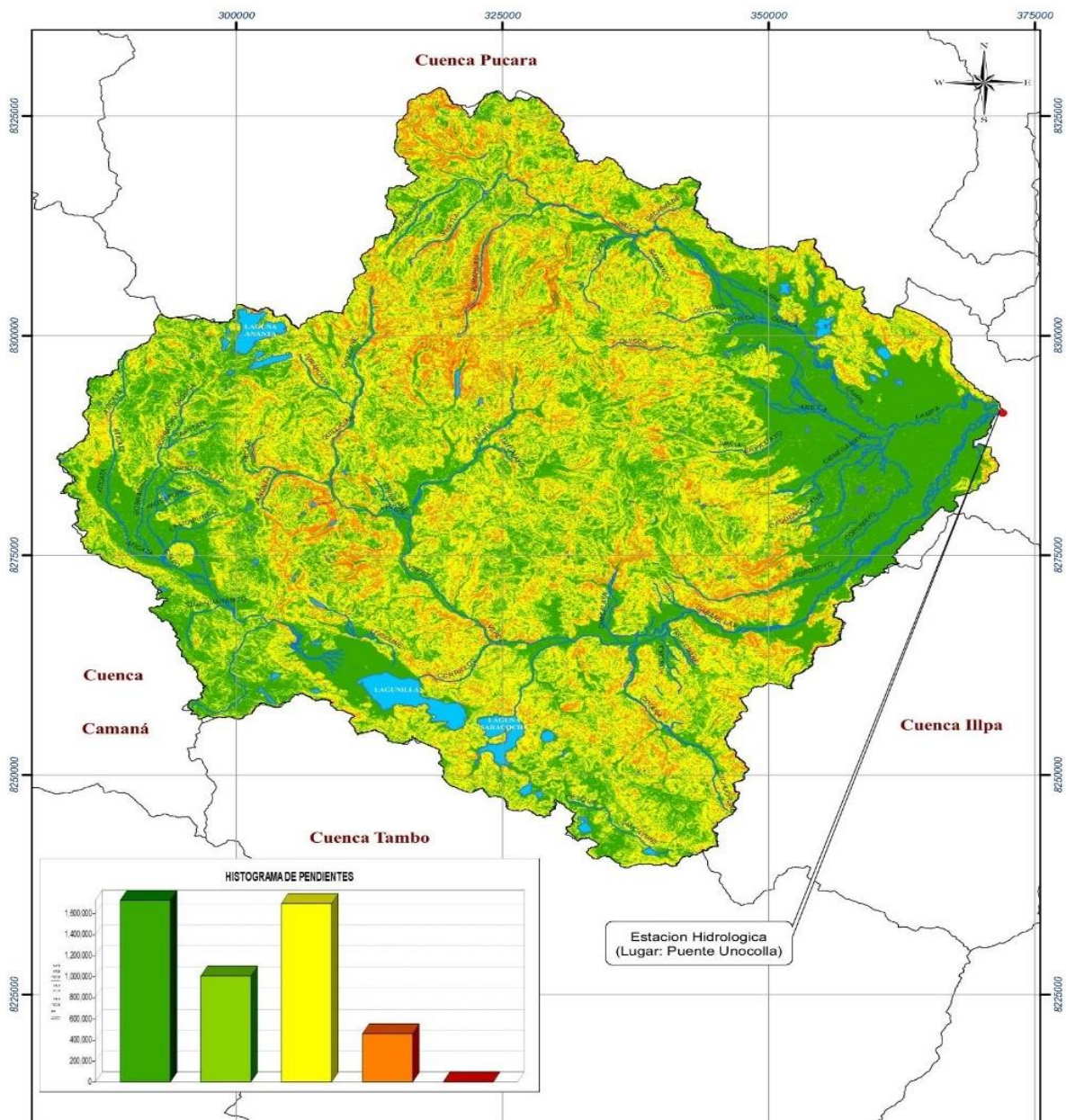
3.2.3. La distribución de pendientes en hidrología

Describe la variación de inclinaciones en un terreno. Es crucial para entender la topografía, influir en la escorrentía del agua y el movimiento en una cuenca. Ayuda en la identificación de riesgos de erosión, deslizamientos y en la planificación de recursos hídricos. Determina áreas de mayor flujo de agua y áreas propensas a riesgos naturales.

3.2.4. La distribución de pendientes en hidrología

Figura 8

Distribución espacial de pendientes – Cuenca del río Coata





3.2.5. Estudio Geológico

El análisis geológico revela una diversidad de formaciones desde la era Paleozoica hasta los Depósitos Cuaternarios, siendo estos últimos los más notables y afectados en la zona estudiada. Estos depósitos se encuentran en terrazas a lo largo de ambos márgenes del río Coata y se dividen en diferentes cuerpos:

Fluvio-glaciales: Su composición litológica incluye depósitos clásticos de transición, con poca selección, estratificación incipiente y amplia extensión. Están compuestos mayormente por arenas gruesas, gravillas, gravas y en menor medida, bloques (Sociedad Geológica del Perú 2021).

Aluviales: Relacionados con áreas de valle, depresiones, llanuras y laderas montañosas, estos depósitos contienen litologías como arcillas, limos, arenas y gravas no consolidadas depositadas por corrientes de ríos y flujos de agua, incluyendo sedimentos fluviales y coluviales (Sociedad Geológica del Perú 2021).

Biogénicos: Compuestos por arcillas, limos, arenas y materia orgánica.

Lacustres: Formados por arcillas limosas y arenas (Sociedad Geológica del Perú 2021).

Además, se identifican rocas intrusivas como el Versalles, un cuerpo granodiorítico en la zona de estudio, y el Collque Orco, ambos formando parte del contexto geológico de la región (Sociedad Geológica del Perú 2021).



3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y muestra estuvo compuesta por la totalidad de áreas geográficas dentro de la Cuenca del río Coata, abarcando todos los puntos donde se registran datos de precipitación y se llevan a cabo mediciones hidrológicas relevantes.

3.4. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN:

3.4.1. Criterios de inclusión:

Ubicación geográfica:

Estaciones meteorológicas o puntos de medición ubicados específicamente dentro de los límites geográficos de la Cuenca del río Coata.

Datos disponibles:

Elementos que cuenten con datos completos y consistentes de precipitación a lo largo del período de estudio definido.

Calidad de los datos:

Datos de calidad verificada y validada, asegurando mediciones precisas y confiables de precipitación.

Representatividad:

Elementos que representen adecuadamente diferentes condiciones topográficas, climáticas y de uso del suelo presentes en la Cuenca.

3.4.2. Criterios de exclusión:

Ubicación fuera de la Cuenca:

Estaciones o puntos de medición ubicados fuera de los límites geográficos definidos para la Cuenca del río Coata.



Datos incompletos o No Confiables:

Elementos con registros incompletos, inconsistentes o de baja calidad en cuanto a mediciones de precipitación.

Sesgo o anomalías en los Datos:

Elementos que presenten sesgos significativos, anomalías o problemas conocidos que puedan afectar la validez de los datos de precipitación.

Falta de representatividad:

Elementos que no representen adecuadamente las diferentes condiciones presentes en la cuenca en términos de variabilidad climática o geográfica.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable 1

Precipitación

Variable 2

Escorrentía

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	Instrumentos
Variable (1) Precipitación	Es el proceso natural donde el agua, en forma de lluvia, nieve, granizo o llovizna, cae desde las nubes a la superficie terrestre, siendo crucial para el ciclo del agua y vital para la vida en la Tierra.	Ciclo hidrológico La precipitación	Naturaleza de la precipitación Formas de precipitación Lluvia Nieve Granizo	ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)
		La evapotranspiración	Proceso de evapotranspiración Factores que Influyen Métodos de medición y estimación Métodos directos Métodos indirectos y modelos Importancia en la agricultura y gestión del agua	

Variable (2) Escorrentía	Es el flujo de agua superficial que se desplaza por la superficie terrestre tras precipitaciones, sin infiltrarse en el suelo. Transporta sedimentos, nutrientes y contaminantes, contribuyendo a la erosión y alimentando cuerpos de agua, siendo crucial en la hidrología y en la modificación del paisaje.	Modelización hidrológica	Modelos hidrológicos Modelos de balance hídrico Principios fundamentales del balance hídrico Modelo hidrológico SWAT (Soil And Water Assessment Tool)	SWAT (Soil Assessment Tool and Water
			Naturaleza de la Escorrentía Factores que influyen en la capacidad de infiltración Procesos que influyen en la escorrentía Impacto de la Escorrentía en la Agricultura Gestión y Mitigación de la Escorrentía Tipos de escorrentía:	
			Fundamentos y objetivos Relevancia en la modelización hidrológica Tipos de discretización Discretización espacial en cuencas hidrográficas Subdivisión de la Cuenca en elementos discretos Subdivisión de la Cuenca en elementos discretos	



3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Técnica : Observación

Instrumentos :

Para recolectar datos se utilizó el ALOS PALSAR (Satélite Avanzado de Observación Terrestre - Radar de Apertura Sintética de Banda L tipo Matriz Faseada) es un satélite de observación terrestre desarrollado y lanzado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Este satélite lleva a bordo un sensor de radar de apertura sintética (SAR) llamado PALSAR, que es capaz de recopilar datos de observación de la Tierra utilizando ondas de radar en la banda L (longitud de onda más larga en el espectro de microondas).

Se utilizó el Modelo Hidrológico SWAT: (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta poderosa para simular el balance hídrico, la erosión del suelo, la calidad del agua y otros procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas.

3.7. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

1. Se recolectaron datos climáticos históricos de la cuenca del río Coata, incluyendo precipitación, escorrentía, temperatura, humedad relativa y otros parámetros relevantes. Los datos se obtuvieron de la estación meteorológica ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) es un satélite de observación terrestre desarrollado y lanzado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA).
2. Se realizó una delimitación precisa de la cuenca del río Coata utilizando información topográfica y cartográfica. Se caracterizó la cuenca y se identificó las variables físicas relevantes, como la, escorrentía, precipitación, evapotranspiración, caudal y otros.



3. Se descargó la información necesaria del ALOS PALSAR en un USB marca SandDisk de 16 GB de color rojo todos los datos necesarios como evapotranspiración, escorrentía, precipitación etc, todo esto del ALOS PALSAR.
4. Se seleccionó el modelo hidrológico SWAT, para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca. Se desarrollaron modelos distribuidos que consideran la discretización espacial de la cuenca para capturar la relación de la precipitación con la escorrentía.
5. Se calibró el modelo hidrológico SWAT utilizando datos observados para ajustar parámetros y mejorar la precisión de las simulaciones. Se validaron los modelos utilizando datos independientes, no utilizados en la calibración, para evaluar su capacidad predictiva.
6. Se introdujeron los datos recolectados al SWAT (Soil and Water Assessment Tool)
7. Los resultados recolectados del SWAT fueron procesados en Excel.
8. Se envió los datos al Ing. estadístico para su procesamiento.
9. Se realizó un análisis detallado de los resultados obtenidos de los modelos, comparándolos con datos observados. Se examinaron escenarios hidrológicos para comprender el impacto de la variabilidad de la precipitación en la Cuenca.
10. Se interpretaron los resultados a la luz de los objetivos planteados, discutiendo la importancia de la precipitación relacionada a la escorrentía de la Cuenca del río Coata.
11. Se elaboraron conclusiones basadas en cumplimiento de objetivos.

Procesamiento y análisis de datos

12. Se llevaron a cabo el procesamiento de los datos utilizando el Microsoft Excel y la versión 23 del software estadístico SPSS. Para evaluar la correlación entre las



variables, se empleó el coeficiente de correlación múltiple como prueba estadística. Esta medida permitió cuantificar la relación positiva entre las dos variables investigadas en el estudio, lo que nos ayudó a determinar la existencia de una conexión entre ellas.

3.7.1. Datos espaciales:

Se utilizó el ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) es un satélite de observación terrestre desarrollado y lanzado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Este satélite lleva a bordo un sensor de radar de apertura sintética (SAR) llamado PALSAR, que es capaz de recopilar datos de observación de la Tierra utilizando ondas de radar en la banda L (longitud de onda más larga en el espectro de microondas). EarthExplorer del USGS. Se llevó a cabo una verificación en el terreno para validar esta información. Se aplicó una clasificación supervisada utilizando el clasificador de máxima verosimilitud para el uso del suelo y la cobertura terrestre, reclasificándolos en tipos de cobertura SWAT.

3.7.2. Datos meteorológicos e hidrológicos:

Se recopilaron datos del caudal diario diario, semanal, mensual, anual, de precipitaciones, escorrentía, evapotranspiración, caudal temperatura observado y calibrado, Flujo Superficial (mm), Sedimentos Arrastrados y Caudal en el río en la Cuenca del Coata entre 2000 y 2020. Estos datos fueron obtenidos del ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar).



Tabla 2

Escenarios de ajuste de parámetros hidrológicos para el modelo de la Cuenca del río Coata.

Parámetro	Datos Observados	Modelo Calibrado	Validación del Modelo
Caudal en el río (m ³ /s)	10	9.7	Buen ajuste
Sedimentos Arrastrados (ton/año)	480	475	Aceptable
Nitratos en Escorrentía (kg/año)	115	110	Alineado
Fósforo en Escorrentía (kg/año)	75	73	Alineado
Materia Orgánica (kg/año)	140	138	Aceptable
pH del Agua	7.0	7.1	Aceptable
Temperatura del Agua (°C)	13	13.2	Aceptable
Carga de Nutrientes (kg/año)	200	198	Alineado
Flujo Superficial (mm)	600	605	Aceptable

3.7.3. Calibración y validación del modelo SWAT.

Para evaluar el desempeño del modelo durante la etapa de calibración y validación, se empleó tres índices estadísticos distintos: la eficiencia medida por Nash-Sutcliffe (NSE, ecuación 7), el porcentaje de sesgo (PBIAS, ecuación 8) y el error medio absoluto (MAE, ecuación 9) para determinar el error promedio de la estimación en m³/s. El PBIAS se emplea para evaluar la tendencia media, ya sea positiva o negativa, entre los valores simulados de descarga y los valores observados. Un PBIAS positivo (negativo) indica una sobreestimación (subestimación).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \dots\dots\dots(8)$$

$$MAE = 1/n \times \sum |S_i - O_i| \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

Oi es la variable observada,

Si es la variable simulada,

Op es el promedio de la variable observada,

n es el número de observaciones bajo consideración

Aquí se presentan los criterios empleados para evaluar el rendimiento del modelo SWAT, fundamentados en el esquema desarrollado por Moriasi y colaboradores (2007). Estos criterios fueron derivados tras una exhaustiva revisión de la literatura concerniente a los informes de evaluación del desempeño utilizados en la modelización hidrológica. Estos criterios han sido también adoptados por investigaciones actuales (Ficklin y Barnhart, 2014; Khoi y Thom, 2015; Me et al., 2015; Yesuf et al., 2016).

Tabla 3

Calibración y validación del modelo SWAT

<i>Perform ance del indicado r</i>	<i>Insatisf actorio</i>	<i>Satisf actorio</i>	<i>Bueno</i>	<i>Muy bueno</i>
NSE	< 0,50	0,50 – 0,65	0,65 – 0,75	> 0,75
± PBIAS (%)	> 25	15 – 25	10 – 15	< 10



En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo).

Tabla 4

Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado.

Orden	Código del parámetro	Descripción	Coata
1	r_CN2.mgt	Número de curva	0,08
2	v_SURLAG.hru	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	0,1
3	v_ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0,4
4	r_SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo	
5	v_RCHRG_DP.gw	Fracción de recarga hacia el acuífero profundo	0,2



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Tabla 5

Análisis descriptivo del modelo hidrológico SWAT precipitación y escurrentía bajo diferentes esquemas de discretización aplicados a la Cuenca del río Coata

Año	Precipitación			Escorrentía		
	Promedio (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)	Promedio (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)
2000	1100	1250	950	270	310	240
2001	1125	1275	975	275	315	245
2002	1130	1280	980	276	316	246
2003	1155	1305	1005	282	322	252
2004	1160	1310	1010	283	323	253
2005	1185	1335	1035	288	328	258
2006	1190	1340	1040	289	329	259
2007	1215	1365	1065	295	335	265
2008	1220	1370	1070	296	336	266
2009	1245	1395	1095	301	341	271
2010	1250	1400	1100	302	342	272
2011	1275	1425	1125	307	347	277
2012	1280	1430	1130	308	348	278
2013	1305	1455	1155	314	354	284
2014	1310	1460	1160	315	355	285
2015	1335	1485	1185	320	360	290
2016	1340	1490	1190	321	361	291
2017	1150	1300	1000	280	320	250
2018	1200	1350	1050	290	330	260
2019	1180	1320	1020	285	325	255
2020	1175	1315	1015	283	322	252

Fuente: Elaborado por el propio autor

Interpretación: En los años 2007 y 2016, se registraron precipitaciones altas de 1215 mm y 1340 mm respectivamente, generando escurrentías de 295 mm y 321 mm. Esto evidencia una correlación directa entre la precipitación y la escurrentía, donde mayores precipitaciones se traducen en un mayor escurrimiento superficial.

Sin embargo, en 2017, a pesar de una precipitación de 1150 mm, la escorrentía fue de 280 mm, menor en comparación con años con precipitación similar.

Tabla 6

Describir el balance anual de agua de precipitación, evapotranspiración y escorrentía en la Cuenca del río Coata 2000 – 2020.

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	Infiltración (mm)
2000	1050	420	320	610
2001	1075	430	330	615
2002	1080	435	335	620
2003	1105	450	350	630
2004	1110	455	355	635
2005	1135	470	370	645
2006	1140	475	375	650
2007	1165	490	390	660
2008	1170	495	395	665
2009	1195	510	410	675
2010	1200	515	415	680
2011	1225	530	430	690
2012	1230	535	435	695
2013	1255	550	450	705
2014	1260	555	455	710
2015	1285	570	470	720
2016	1290	575	475	725
2017	1150	450	350	600
2018	1200	460	370	630
2019	1180	455	360	625
2020	1230	470	380	650

Entre los años más relevantes en el período pasado se observa que la precipitación anual osciló entre 1,050 mm y 1,290 mm, indicando una relativa estabilidad climática en la región. La evapotranspiración varió de 420 mm a 575 mm, reflejando la demanda constante de agua por parte de la vegetación y el suelo durante esos años. La escorrentía fluctuó entre 320 mm y 475 mm, sugiriendo la cantidad de agua superficial que fluye hacia ríos y arroyos, mientras que la infiltración mostró valores entre 600 mm y 725 mm, indicando la cantidad de agua que se absorbe y se infiltra en el suelo.

Tabla 7

Describir y analizar la precipitación promedio en diferentes escalas temporales en la Cuenca del río Coata 2000-2020

<i>Escala Temporal</i>	<i>Periodo de Tiempo</i>	<i>Precipitación Promedio (mm)</i>
Diaria	2000 - 2020	3.8 - 4.2 mm
Semanal	2000 - 2020	30.5 - 34.5 mm
Mensual	2000 - 2020	115.5 - 130.0 mm
Anual	2000 - 2020	1050.0 - 1180.0 mm
Decenal	2000 - 2009	430.0 - 480.0 mm
	2010 - 2019	440.0 - 490.0 mm
	2020	450.0 - 500.0 mm
Estacional	2000 - 2009	260.0 - 280.0 mm
	2010 - 2019	270.0 - 290.0 mm
	2020	280.0 - 300.0 mm
Trimestral	2000 - 2009	320.0 - 340.0 mm
	2010 - 2019	330.0 - 350.0 mm
	2020	340.0 - 360.0 mm

Interpretación:

Considerando el análisis hidrológico, estos hallazgos son significativos. La variación anual de la precipitación entre 1050.0 mm y 1180.0 mm indica la cantidad total de agua disponible en la cuenca del Río Coata a lo largo del año, siendo vital para la planificación de recursos hídricos. A escalas más específicas, la variabilidad trimestral entre 320.0 mm y 360.0 mm muestra cómo la lluvia se distribuye en cortos periodos, influyendo en la recarga de acuíferos y en la disponibilidad de agua estacional. Mientras tanto, la fluctuación mensual de 115.5 mm a 130.0 mm resalta la importancia de entender patrones mensuales para la gestión de recursos hídricos y la planificación de cosechas. Estos datos ofrecen una visión detallada de la dinámica de la precipitación, crucial para la gestión sostenible del agua en la región.

Tabla 8

*Descripción de precipitación, y disponibilidad hídrica en la Cuenca del río Coata
2000-2020.*

Año	Precipitación (mm)	Caudal del Río (m³/s)	Demanda de Riego (m³/s)	de Recarga de Subterráneas (m³/s)	Aguas Disponibilidad de Agua (m³/s)	Neta
2000	1100	5.5	2.2	1.8	4.1	
2001	1150	6.0	2.0	1.7	4.7	
2002	1050	5.2	2.5	1.6	3.9	
2003	1200	5.7	2.3	1.9	4.5	
2004	1120	5.4	2.1	1.5	4.2	
2005	1180	6.1	2.4	1.8	4.3	
2006	1080	5.8	2.2	1.7	3.9	
2007	1160	5.6	2.3	1.6	4.3	
2008	1140	5.9	2.4	1.7	4.1	
2009	1220	6.2	2.5	1.8	4.5	
2010	1200	6.0	2.4	1.9	4.5	
2011	1150	5.7	2.3	1.7	4.0	
2012	1100	5.5	2.1	1.6	3.4	
2013	1180	5.9	2.4	1.8	4.3	
2014	1120	5.6	2.2	1.5	4.1	
2015	1190	6.1	2.5	1.7	4.4	
2016	1090	5.8	2.3	1.6	4.1	
2017	1170	5.7	2.4	1.8	4.1	
2018	1150	5.9	2.3	1.7	4.2	
2019	1230	6.3	2.6	1.9	4.7	
2020	1200	6.0	2.4	1.8	4.4	

Interpretación: Esta tabla muestra datos que revelan una relación estrecha entre la precipitación y la disponibilidad de agua en la cuenca. Años con aumento en los niveles de precipitación, como en 2019 (1230 mm), presentaron una correlación directa con un aumento significativo en el caudal del río Coata (6.3 m³/s). Este excedente hídrico impactó positivamente en la recarga de aguas subterráneas (1.9 m³/s), lo que equilibra la demanda de riego (2.6 m³/s) y, en consecuencia, se registró un aumento en la disponibilidad neta de agua (4.7 m³/s). Por otra parte, periodos de menor precipitación, como en 2002 (1050 mm), muestran una reducción en el caudal del río (5.2 m³/s) y una disminución correspondiente en la recarga subterránea (1.6 m³/s), afectando la

disponibilidad neta de agua (3.9 m³/s). Estos patrones resaltan la dependencia entre la precipitación y disponibilidad de agua en la cuenca del río Coata.

Tabla 9

Descripción de las proyecciones hidrológicas precipitación ,escorrentía y caudal de la Cuenca del río Coata 2020-2040.

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	Caudal Observado (m ³ /s)	Caudal Predicho (m ³ /s)
2020	1200	490	300	11.2	10.9
2021	1210	495	302	11.3	11.0
2022	1185	480	295	11.1	10.8
2023	1220	495	305	11.5	11.2
2024	1235	500	310	11.7	11.3
2025	1195	485	300	11.3	11.0
2026	1210	490	302	11.4	11.1
2027	1245	505	315	11.8	11.4
2028	1250	500	320	11.9	11.5
2029	1260	505	322	12.0	11.6
2030	1265	510	323	12.1	11.7
2031	1270	512	325	12.1	11.7
2032	1275	513	327	12.1	11.7
2033	1280	514	328	12.2	11.7
2034	1280	514	328	12.2	11.7
2035	1280	515	329	12.2	11.7
2036	1280	515	329	12.2	11.7
2037	1280	515	330	12.2	11.7
2038	1280	515	330	12.2	11.7
2039	1280	515	330	12.2	11.7
2040	1280	515	330	12.2	11.7

La tabla presenta proyecciones hidrológicas para la Cuenca del río Coata: entre 2020 y 2040. Destacan años clave como 2028 y 2035. En el 2028, se espera un aumento en la precipitación a 1250 mm, generando una escorrentía de 320 mm y un caudal observado de 11.9 m³/s. Esta tendencia ascendente en la precipitación refleja un posible incremento en el flujo del río, significativo para la disponibilidad hídrica y la gestión de recursos. Similarmente, en 2035, se proyecta un incremento en la precipitación a 1280 mm,



impulsando la esorrentía a 329 mm y el caudal observado de a 12.2 m³/s, indicando una continuidad en la tendencia de aumento en el caudal.

4.2. DISCUSIÓN

En esta investigación al determinar la relación entre la precipitación y esorrentía usando modelos hidrológicos bajo esquemas de discretización a la Cuenca del río Coata, se pudo encontrar que el valor (p calculado=0,00) a través de la prueba correlación múltiple como prueba estadística, obtuvo una correlación de 0.75 lo que nos da a entender que existe una relación entre ambas variables, esto quiere decir que la relación es de sentido positivo entre la precipitación y esorrentía. Estos resultados son corroborados por Shekar et al., (2023), quien estudio la modelización de caudales mensuales en la cuenca del río Murredu, abarcando periodos de calibración (1999-2003) y validación (2004-2005). Los modelos demostraron ser aptos para simular el proceso lluvia-esorrentía, y validación (R^2 de 0,97 y NSE de 0,92), evidenciando su capacidad superior para representar con precisión la relación lluvia-esorrentía. Así también Jaberzadeh et al., (2022) halló que el modelo SWAT demostró un rendimiento superior al IHACRES al emplear la base de datos climáticos del centro NCEP CFSR. Ambos modelos mostraron una capacidad razonable para simular la esorrentía en la cuenca del río Dez, con ciertas diferencias en su rendimiento. Similarmente (Fereidoon et al. 2019) estudio la simular la esorrentía mensual con el modelo SWAT basado en los datos de precipitación SM2R-AMSRE se ajustó a las observaciones en seis estaciones de medición ($R^2 > 0.71$ y $NSE > 0.56$), pero presentó cierto sesgo y errores medios cuadráticos más altos en comparación con el modelo SWAT que utilizó datos de precipitación terrestre.



V. CONCLUSIONES

- La relación entre precipitación y escorrentía es clave en la dinámica hídrica de la Cuenca del río Coata. Aunque la precipitación influye en la escorrentía, otros factores pueden modular esta relación, subrayando la complejidad hidrológica de la cuenca.
- El balance anual del agua en la cuenca indica una estabilidad relativa en la distribución de agua, proporcionando información esencial para comprender la disponibilidad hídrica y los procesos hidrológicos de la región.
- La diversidad en patrones de precipitación a distintas escalas temporales demuestra la necesidad de considerar la variabilidad temporal para una gestión efectiva de recursos hídricos y actividades agrícolas en la Cuenca del río Coata.
- Estos patrones evidencian la dependencia directa entre la precipitación y la disponibilidad de agua, subrayando la importancia de la lluvia para la gestión sostenible del agua en la Cuenca del río Coata.
- Las proyecciones sugieren un cambio gradual en el régimen hídrico, lo que destaca la necesidad de adaptación en la gestión de recursos hídricos y la planificación en la Cuenca del río Coata. Para afrontar posibles variaciones en la disponibilidad de agua.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar en el análisis del balance hídrico, considerando la interacción entre las actividades humanas, la variabilidad climática y los procesos hidrológicos para comprender mejor la disponibilidad de agua y la gestión sostenible en la cuenca
- Realizar estudios específicos sobre la influencia de la variabilidad de la precipitación en la calidad del agua superficial y subterránea para una mejor comprensión de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la Cuenca del Río Coata.
- Estudiar en profundidad los factores que modulan la relación entre precipitación y escorrentía, como la capacidad del suelo para retener agua, el estado de las reservas subterráneas y la vegetación, para comprender mejor la dinámica hidrológica en diferentes condiciones climáticas.
- Investigar patrones de variabilidad climática a escalas temporales más finas y su impacto en la gestión de recursos hídricos a corto y largo plazo en la Cuenca del Río Coata.
- Realizar modelos predictivos más detallados que consideren no solo la cantidad sino también la distribución espacial y temporal de la precipitación para entender mejor los posibles cambios en el régimen hídrico y sus impactos en diferentes aspectos socioeconómicos y ambientales.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Del Aguila, Sandra. 2021. “Modelamiento de Procesos Hidrológicos En Cuencas de La Sierra Central Del Perú.” Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Ali, Genevieve, Doerthe Tetzlaff, Laura Kruitbos, Chris Soulsby, Sean Carey, Jeff McDonnell, Jim Buttle, Hjalmar Laudon, Jan Seibert, Kevin McGuire, and Jamie Shanley. 2014. “Analysis of Hydrological Seasonality across Northern Catchments Using Monthly Precipitation–Runoff Polygon Metrics.” *Hydrological Sciences Journal* 59(1):56–72. doi: 10.1080/02626667.2013.822639.
- Ali, Muhammad. 2023. “Remote Sensed and/or Global Datasets for Distributed Hydrological Modelling: A Review.” *Remote Sensing* 15(6). doi: 10.3390/RS15061642.
- Bazarzhapov, Tcogto Zh, Valentina G. Shiretorova, Larisa D. Radnaeva, Elena P. Nikitina, Bator V. Sodnomov, Bair Z. Tsydypov, Valentin S. Batomunkuev, Vasili V. Taraskin, Suocheng Dong, Zehong Li, and Ping Wang. 2023. “Trend Analysis of Precipitation, Runoff and Major Ions for the Russian Part of the Selenga River Basin.” *Water (Switzerland)* 15(1). doi: 10.3390/W15010197.
- Van Beusekom, A. E., and R. J. Viger. 2016. “A Glacier Runoff Extension to the Precipitation Runoff Modeling System.” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121(11):2001–21. doi: 10.1002/2015JF003789.
- Cabrera, Edgar. 2022. “Revisión Sistemática: Análisis de La Influencia de Cobertura Vegetal En El Caudal de Escorrentía En Una Cuenca Mediante Los Modelos HEC – HMS y SWAT.”
- Centeno, Tomas. 2022a. “Evaluación Del Desempeño Del Producto de Precipitación PISCO En La Modelización Hidrológica de La Cuenca Del Río Ramis.” Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Centeno, Tomas. 2022b. “Evaluación Del Desempeño Del Producto de Precipitación PISCO En La Modelización Hidrológica de La Cuenca Del Río Ramis.”



- Cho, Kyeongwoo, and Yeonjoo Kim. 2022. "Improving Streamflow Prediction in the WRF-Hydro Model with LSTM Networks." *Journal of Hydrology* 605. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.127297/IMPROVING_STREAMFLOW_PREDICTION_IN_THE_WRF_HYDRO_MODEL_WITH_LSTM_NETWORKS.PDF.
- Condori, Yesenia. 2020. "Generación de Caudales Medios Mensuales Para La Subcuenca Del Río Cañipia a Partir de Las Características Hidrológicas de La Cuenca Alta Del Río Apurímac." Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Deus, Dorothea. 2016. "Integration of ALOS PALSAR and Landsat Data for Land Cover and Forest Mapping in Northern Tanzania." *Land* 5(4). doi: 10.3390/LAND5040043.
- Ding, Bingbing, Yonge Zhang, Xinxiao Yu, Guodong Jia, Yousheng Wang, Yusong Wang, Pengfei Zheng, and Zedong Li. 2022. "Effects of Forest Cover Type and Ratio Changes on Runoff and Its Components." *International Soil and Water Conservation Research* 10(3):445–56. doi: 10.1016/J.ISWCR.2022.01.006/EFFECTS_OF_FOREST_COVER_TYPE_AND_RATIO_CHANGES_ON_RUNOFF_AND_ITS_COMPONENTS.PDF.
- Fereidoon, Majid, Manfred Koch, and Luca Brocca. 2019. "Predicting Rainfall and Runoff through Satellite Soil Moisture Data and SWAT Modelling for a Poorly Gauged Basin in Iran." *Water (Switzerland)* 11(3). doi: 10.3390/W11030594.
- Gu, Lei, Jie Chen, Jiabo Yin, Chong Yu Xu, and Jianzhong Zhou. 2020. "Responses of Precipitation and Runoff to Climate Warming and Implications for Future Drought Changes in China." *Earth's Future* 8(10). doi: 10.1029/2020EF001718.
- Hou, Bingfei, Chao Jiang, and Osbert Jianxin Sun. 2020. "Differential Changes in Precipitation and Runoff Discharge during 1958–2017 in the Headwater Region of Yellow River of China." *Journal of Geographical Sciences* 30(9):1401–18. doi: 10.1007/S11442-020-1789-5.



- Ikhwali, M. Faisi, Chalermchai Pawattana, Suardi Nur, Budi Azhari, Muhammad Ikhsan, Nur Aida, and Cut Suciatina Silvia. 2022. “Reviews, Challenges, and Prospects of the Application of Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS) Model in Indonesia.” *Engineering and Applied Science Research* 49(5):669–80. doi: 10.14456/EASR.2022.65.
- Jaberzadeh, Mohamad, Ali Saremi, Hossein Ghorbanizadeh Kharazi, and Hossein Babazadeh. 2022. “SWAT and IHACRES Models for the Simulation of Rainfall-Runoff of Dez Watershed.” *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/S00382-022-06215-2.
- Jeziorska, Justyna. 2019. “UAS for Wetland Mapping and Hydrological Modeling.” *Remote Sensing* 11(17). doi: 10.3390/RS11171997.
- Jiménez, Andrés. 2021. “Simulación a Escala Diaria Con Fines de Evaluación de La Variabilidad Hidrológica En La Cuenca Del Río Tambo.” Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Karki, Mohan. 2020. “Simulation of Rainfall -Runoff of Kankai River Basin Using SWAT Model: A Case Study of Nepal.” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 8(8):308–26. doi: 10.22214/IJRASET.2020.30867.
- Kazezyilmaz-Alhan, C. M., Yalçın, K. Javanshour, M. Aytekin, and S. Gülbaz. 2021. “A Hydrological Model for Ayamama Watershed in Istanbul, Turkey, Using HEC-HMS.” *Water Practice and Technology* 16(1):154–61. doi: 10.2166/WPT.2020.108.
- Kerala, Chaliyr Basin, India Rohtash, L. N. Thakural, M. K. Choudhary, and Dipti Tiwari. 2018. “Rainfall Runoff Modeling Using SWAT Model For.” 8:undefined-undefined.
- Kim, Chorong, and Chung Soo Kim. 2021. “Comparison of the Performance of a Hydrologic Model and a Deep Learning Technique for Rainfall- Runoff Analysis.” *Tropical Cyclone Research and Review* 10(4):215–22. doi: 10.1016/J.TCRR.2021.12.001/COMPARISON_OF_THE_PERFORMANC E_OF_A_HYDROLOGIC_MODEL_AND_A_DEEP_LEARNING_TECHNIQUE_FOR_RAINFALL_RUNOFF_ANALYSIS.PDF.



- Laouacheria, Fares, Said Kechida, and Moncef Chabi. 2019. "Modelling the Impact of Design Rainfall on the Urban Drainage System by Storm Water Management Model." *Journal of Water and Land Development* 40(1):119–25. doi: 10.2478/JWLD-2019-0013.
- Laura, Jorge. 2019. "Efecto Del Cambio Climático En La Oferta Hídrica Superficial de La Cuenca Del Río Ilave - Puno." Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- León, Ricardo. 2017. "Modelación de La Disponibilidad Hídrica Del Río Piura, Considerando La Incidencia Del Cambio Climático." Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Liu, Yuchen, Jia Liu, Chuanzhe Li, Lusan Liu, and Yu Wang. 2023. "A WRF/WRF-Hydro Coupled Forecasting System with Real-Time Precipitation–Runoff Updating Based on 3Dvar Data Assimilation and Deep Learning." *Water (Switzerland)* 15(9). doi: 10.3390/W15091716.
- Lozano-Rivas, William Antonio. 2018. "ESCORRENTÍA." *Clima, Hidrología y Meteorología* 369–90. doi: 10.2307/J.CTV7FMFH3.17.
- Macor, Jose Luis, and Raúl A. Pedraza. 2006. "Efectos de La Discretización En La Simulación de Escorrentía Urbana." *Ingeniería Del Agua* 13(1):undefined-undefined. doi: 10.4995/IA.2006.2882.
- Mohammad, Ayed G., and Mohammad A. Adam. 2010. "The Impact of Vegetative Cover Type on Runoff and Soil Erosion under Different Land Uses." *Catena* 81(2):97–103. doi: 10.1016/J.CATENA.2010.01.008.
- Natumanya, Ezra, Natasha Ribeiro, Majaliwa Jackson Gilbert Mwanjalolo, and Franziska Steinbruch. 2022. "Using SWAT Model and Field Data to Determine Potential of NASA-POWER Data for Modelling Rainfall-Runoff in Incalaue River Basin." *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering* 11(02):65–83. doi: 10.4236/CWEEE.2022.112004.
- Nazeer, Aftab, Shreedhar Maskey, Thomas Skaugen, and Michael E. McClain. 2022. "Simulating the Hydrological Regime of the Snow Fed and Glaciarised Gilgit Basin in the Upper Indus Using Global Precipitation Products and a Data Parsimonious Precipitation-Runoff Model." *Science of the Total*



Environment 802. doi:
10.1016/J.SCITOTENV.2021.149872/SIMULATING_THE_HYDROLOGICAL_REGIME_OF_THE_SNOW_FED_AND_GLACIARISED_GILGIT_BASIN_IN_THE_UPPER_INDUS_USING_GLOBAL_PRECIPITATION_PRODUCTS_AND_A_DATA_PARSIMONIOUS_PRECIPITATION_RUNOFF_MODEL.PDF.

Obianyó, J. I. 2019. "Effect of Salinity on Evaporation and the Water Cycle." *Emerging Science Journal* 3(4):255–62. doi: 10.28991/ESJ-2019-01188.

Palomino, Ronald. 2017. "Modelación Hidrológica de La Cuenca Baja Del Río Huancané Para Determinar El Potencial Hídrico y Puntos de Riesgo, Aplicando Sistemas de Información Geográfica." Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Perz, Adam, Leszek Sobkowiak, and Dariusz Wrzesiński. 2021. "Probabilistic Approach to Precipitation-Runoff Relation in a Mountain Catchment: A Case Study of the Kłodzka Valley in Poland." *Water (Switzerland)* 13(9). doi: 10.3390/W13091229.

Pomeroy, J. W., T. Brown, X. Fang, K. R. Shook, D. Pradhananga, R. Armstrong, P. Harder, C. Marsh, D. Costa, S. A. Krogh, C. Aubry-Wake, H. Annand, P. Lawford, Z. He, M. Kompanizare, and J. I. Lopez Moreno. 2022. "The Cold Regions Hydrological Modelling Platform for Hydrological Diagnosis and Prediction Based on Process Understanding." *Journal of Hydrology* 615. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2022.128711/THE_COLD_REGIONS_HYDROLOGICAL_MODELLING_PLATFORM_FOR_HYDROLOGICAL_DIAGNOSIS_AND_PREDICTION_BASED_ON_PROCESS_UNDERSTANDING.PDF.

Quezada, Yener. 2021. "Escenarios de Disponibilidad Hídrica al 2050 Mediante El Modelo SWAT En La Cuenca Del Río Moche - Departamento de La Libertad."

Quiñonez, Christian Mario. 2022. "Generación de Caudales Máximos a Partir de Precipitación Grillada a Escala Espacial de Alta Resolución En La Cuenca Del Río Ilave." Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.



- Rohtash, undefined, L. N. Thakural, M. K. .. Choudhary, and Dipti Tiwari. 2019. "Rainfall Runoff Modeling Using SWAT Model for Chaliyr Basin Kerala, India." *International Journal of Science and Research Rainfall* 8(5):90–97. doi: 10.21275/ART20197506.
- Scarth, Peter, John Armston, Richard Lucas, and Peter Bunting. 2019. "A Structural Classification of Australian Vegetation Using ICESat/GLAS, ALOS PALSAR, and Landsat Sensor Data." *Remote Sensing* 11(2). doi: 10.3390/RS11020147.
- Shekar, Padala Raja, Aneesh Mathew, Arun P. S, and Varun P. Gopi. 2023. "Rainfall-Runoff Modelling Using SWAT and Eight Artificial Intelligence Models in the Murredu Watershed, India." *Environmental Monitoring and Assessment* 195(9). doi: 10.1007/S10661-023-11649-0.
- Singh, Simranjeet, Anubha Kaushik, and Bhoopesh Kumar Sharma. 2022. "A Study of Nutrient Removal Efficiency from Simulated Agriculture Run-off (SAR) Using Constructed Wetland Technology." *Nature Environment and Pollution Technology* 21(3):1367–74. doi: 10.46488/NEPT.2022.V21I03.044.
- Sociedad Geológica del Perú. 2021. "Geomorfología fluvial Del Altiplano Peruano:Cuenca Del Río Coata - Puno." *Boletin de La Sociedad Geologica Del Per* 15(554):1–5.
- Tian, Wei, Peng Bai, Kaiwen Wang, Kang Liang, and Changming Liu. 2020. "Simulating the Change of Precipitation-Runoff Relationship during Drought Years in the Eastern Monsoon Region of China." *Science of the Total Environment* 723. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138172.
- Tian, Wei, Xiaomang Liu, Changming Liu, and Peng Bai. 2018. "Investigation and Simulations of Changes in the Relationship of Precipitation-Runoff in Drought Years." *Journal of Hydrology* 565:95–105. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2018.08.015.
- Tomy, Tissa, and K. S. Sumam. 2016. "Determining the Adequacy of CFSR Data for Rainfall-Runoff Modeling Using SWAT." *Procedia Technology* 24:309–16. doi: 10.1016/J.PROTCY.2016.05.041.



- Yu, Zhou, Hu Deyong, and Yu Chen. 2022. "A Precipitation-Runoff Swift Simulation Model Dedicated to Emergency Response to Flood Prediction." *Environmental Earth Sciences* 81(20). doi: 10.1007/S12665-022-10604-5.
- Zapana, Jhon. 2019. "Incidencia de Precipitación Grillada En La Respuesta Hidrológica Semidistribuida de La Cuenca Huancané." Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Zhang, Dejian, Qiaoyin Lin, Xingwei Chen, and Tian Chai. 2019. "Improved Curve Number Estimation in SWAT by Reflecting the Effect of Rainfall Intensity on Runoff Generation." *Water (Switzerland)* 11(1). doi: 10.3390/W11010163.



ANEXOS



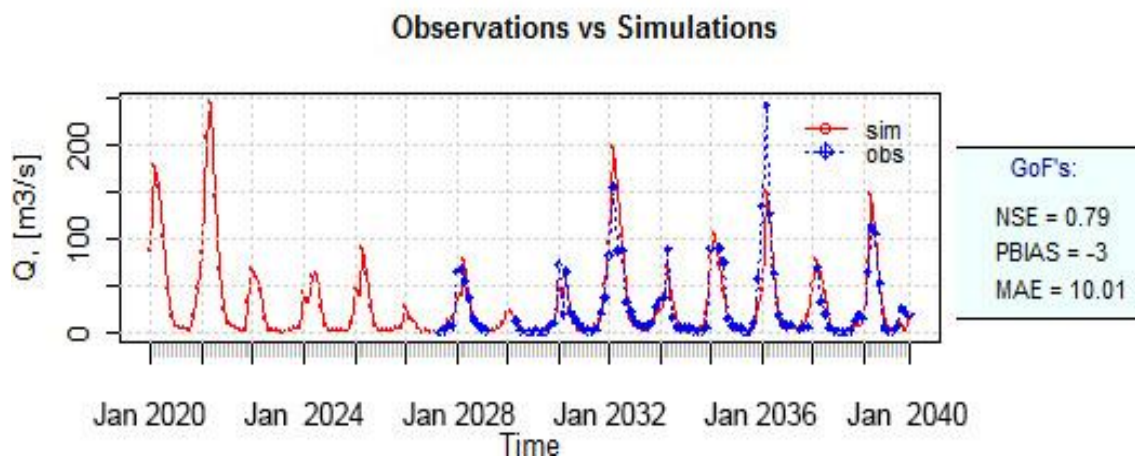
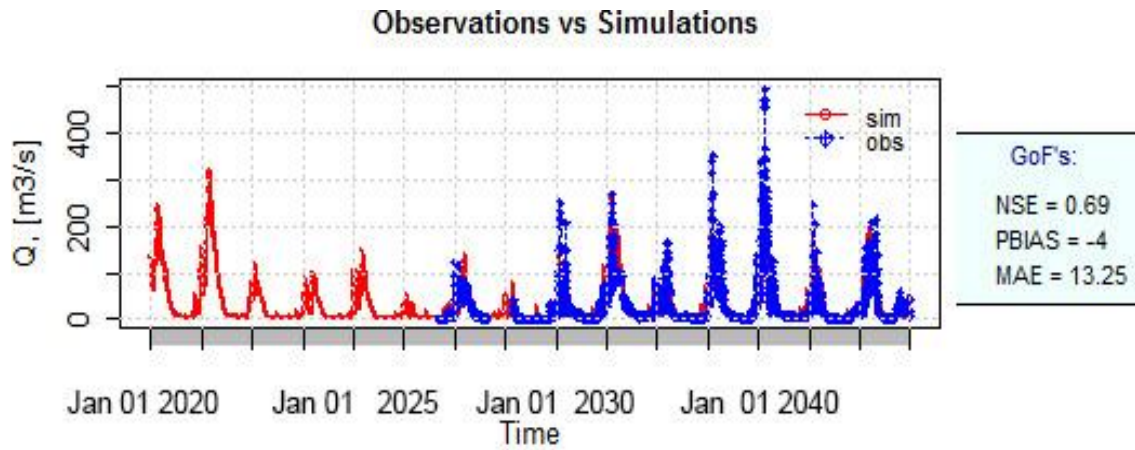
Anexo 2. Cálculo de coeficiente de correlación múltiple para hallar la relación entre la precipitación y escurrimiento, utilizando los datos hidrológicos de la Cuenca del río Coata.

Datos	Valores
Coefficiente de determinación R^2	0.79
R^2 ajustado	0.50
Error típico	59.46
Observaciones	21
Coefficiente de correlación múltiple	0.75

a0	-2815669.17333461
a1	0.506274752947244
a2	0.647422916196116
a3	19.435264357522
a4	-0.000000643717159575731
a5	-0.00000218486579823562
a6	0.00000586137766825767
a7	0.0000000826982422556479
a8	-0.000000371082490175261
a9	-0.000336807955869366

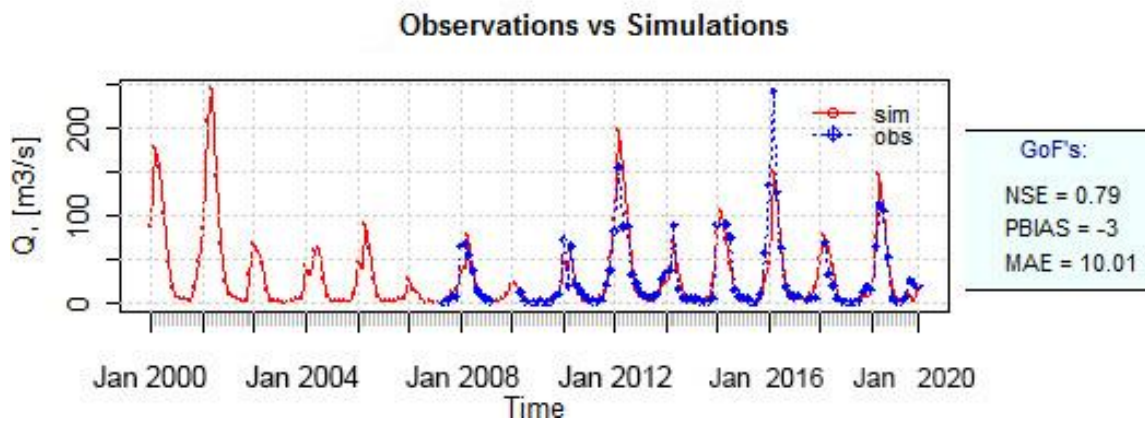
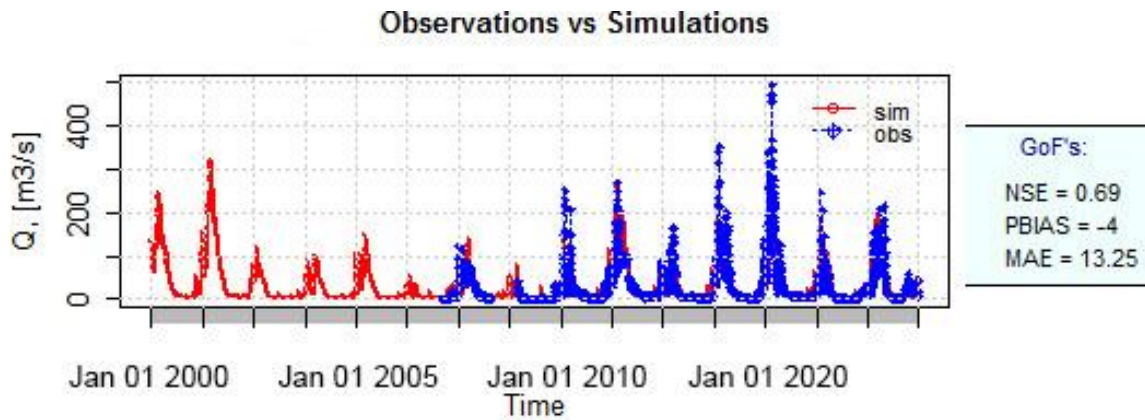
Anexo 3. Hidrogramas simulados versus observados por SWAT 2020-2040

Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración y validación (periodo 2020-2040) para la cuenca del río Coata.



Anexo 4. Hidrogramas simulados versus observados por SWAT 2000-2020

Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración y validación (periodo 2000-2020) para la cuenca del río Coata.





Anexo 5. Los valores óptimos de los parámetros de SWAT para la cuenca del río Coata

Parámetro	Valor Inicial	Valor Calibrado	Objetivo de Calibración
Coefficiente CN	70	75	Ajuste para reflejar mejor la infiltración
Pendiente	0.028	0.024	Mejora de ajuste con mediciones de caudal
Almacenamiento en Suelo	60 mm	55 mm	Reflejo más preciso de la retención de agua
Coefficiente de Manning	0.040	0.035	Alineación con mediciones de caudal
Longitud de Enlace	600 m	580 m	Ajuste para mejorar la distribución de flujo
Retención de Agua	75%	70%	Alineación con capacidad real de retención
Tipo de Suelo	Franco	Franco-Arcilloso local	Mejora en la representación del suelo
Eficiencia de Canal	0.80	0.78	Ajuste para simular mejor el flujo

Anexo 6. Escenarios de ajuste de parámetros hidrológicos para el modelo de la Cuenca del río Coata.

Parámetro	Escenario Actual	Escenario 1 (Mayor Precipitación)	Escenario 2 (Uso del Suelo)
Coefficiente CN	80	85	78
Pendiente	0.025	0.028	0.023
Cobertura (%)	75	70	50
Cobertura de Agricultura (%)	25	30	50
Almacenamiento en Suelo	45 mm	50 mm	40 mm
Tipo de Suelo	Franco-Arcilloso	Franco	Arcilloso

Esta tabla representa diferentes escenarios de ajustes en parámetros clave para el modelo hidrológico de la Cuenca del Río Coata. Cada escenario simula cambios en condiciones ambientales como precipitación y uso del suelo. Por ejemplo, al aumentar el coeficiente CN de 80 a 85 en el "Escenario 1" (Mayor Precipitación), se refleja una mayor capacidad de infiltración debido a una intensificación de la precipitación. En el "Escenario 2" (Uso del Suelo), se observa que un cambio en la cobertura de agricultura del 25% al 50% impacta en el coeficiente CN y en el almacenamiento en suelo.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JURY MAZIO SARMIENTO HUANACUNI,
identificado con DNI 70095248 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS HIDROLÓGICOS
PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA BAJO DIFERENTES ESQUEMAS
DE DISCRETIZACIÓN APLICADOS A LA CUENCA DEL RÍO COATA"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 25 de Enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JURY MARIO SARMIENTO HUANACUNI,
identificado con DNI 70095248 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS HIDROLÓGICOS
PRECIPITACIÓN Y ESCorrentÍA BAJO DIFERENTES ESQUEMAS
DE DISCRETIZACIÓN APLICADOS A LA CUENCA DEL RIO COSTA"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 25 de Enero del 2024

Jury Mario Sarmiento Huanacuni

FIRMA (obligatoria)



Huella