Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

Influencia de la discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura para la generación de caudales naturales diarios simulados

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Ronaldo Ruger BRIOSO CRUZ

ASESOR

Dr. Douglas Donal SARANGO JULCA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Brioso, R. (2026). *Influencia de la discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura para la generación de caudales naturales diarios simulados*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ronaldo Ruger Brioso Cruz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70945700
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07136313
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7963-1507
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Miguel Ernesto Arámbulo Manrique
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07418845
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Arístides Ramon Serruto Colque
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01284486
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	No pertenece a un grupo de investigación
Agencia de financiamiento	Autofinanciada (recursos propios)

Ubicación geográfica de la investigación	Cuenca del río Huaura, departamento de Lima, Perú. Punto de salida del modelo: estación hidrométrica Sayán.
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2025–2026
URL de disciplinas OCDE	Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11

UNMSM
Firmado digitalmente por ARAMBULO MANRIQUE Miguel Ernesto FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 26.10.2026 13:09:55 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS

Siendo las 18:00 horas del jueves 22 de octubre del 2026, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Mg. Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE, y con la asistencia del asesor Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, y miembro Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMON SERRUTO COLQUE se dio inicio a la sesión pública de sustentación de tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la sustentación y aprobación de una tesis del Bachiller:

RONALDO RUGER BRIOSO CRUZ

El presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la tesis, así corno del resumen del expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su tesis titulada "INFLUENCIA DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA EN EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO HUAURA PARA LA GENERACIÓN DE CAUDALES NATURALES DIARIOS SIMULADOS."

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

18	DIECIOCHO	APROBADO CON HONORES
(NUMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

El presidente del Jurado del Mg. Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller RONALDO RUGER BRIOSO CRUZ, Ingeniero Mecánico de Fluidos.
Siendo las 19:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Mg. Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE
PRESIDENTE

Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMON SERRUTO COLQUE
MIEMBRO TITULAR

Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

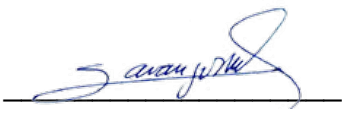
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Dr. Douglas Donal Sarango Julca**, en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N° **009-EPIMF-2026-FCF/UNMSM**, de la tesis titulada «**Influencia de la discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura para la generación de caudales naturales diarios simulados**», presentada por el bachiller **Ronaldo Ruger Brioso Cruz** para optar el título profesional de **Ingeniero Mecánico de Fluidos**.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **8 %** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del **título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos**.

Lima, 26 de octubre de 2026

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor: Dr. Douglas Donal Sarango Julca

DNI: 07136313

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi única fuente de verdadera paz, aquella que sobrepasa todo entendimiento. Gracias por darme fortaleza, sabiduría y perseverancia para afrontar los desafíos y alcanzar esta meta.

A mis padres, Davia y Fausto, por su amor, su ejemplo de esfuerzo y su apoyo incondicional. Sus enseñanzas me han acompañado en cada etapa de mi formación personal y profesional.

A mis hermanos, Jefer, Daniel, Talita, Meilli y Evelin, por su cariño, confianza y aliento constante. Cada uno ha sido parte de este camino y de la alegría que representa alcanzar esta meta.

A Marjoril y a BERO, por la compañía, la comprensión y el apoyo brindados durante este proceso, especialmente en los momentos que exigieron paciencia y perseverancia.

A quienes permanecen en mi memoria, por los recuerdos y enseñanzas que siguen acompañándome. A Akamaru, por su lealtad y compañía durante las jornadas de estudio y trabajo.

A mi asesor, Dr. Douglas Donal Sarango Julca, por su orientación académica y sus valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, por la formación recibida y por contribuir a mi desarrollo profesional.

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue evaluar la influencia de la discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) dentro del modelamiento hidrológico semidistribuido de la cuenca del río Huaura, orientado a la generación de caudales naturales diarios simulados mediante HEC-HMS v.4.13.0. Para ello, se analizaron siete escenarios de discretización espacial conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, correspondientes a los periodos comprendidos entre enero y mayo de los años 2016, 2017 y 2018.

Los escenarios fueron desarrollados a partir de información de precipitación, modelo digital de elevaciones (DEM), uso y cobertura del suelo y número de curva (CN), insumos empleados para representar las condiciones físicas e hidrológicas de la cuenca. La configuración del modelo hidrológico consideró el método SCS Curve Number para la estimación de pérdidas, el Hidrograma Unitario SCS para la transformación lluvia-escorrentía, el método Recession para el flujo base y el método Muskingum para el tránsito de caudales. La estación de aforo Sayán fue utilizada como referencia hidrométrica complementaria y contextual para contrastar la magnitud general y el comportamiento temporal de los caudales simulados. Debido a que sus registros pueden estar influenciados por la regulación hidráulica existente aguas arriba, dicha información no fue empleada para la calibración o validación estricta del modelo.

Los caudales naturales diarios simulados fueron evaluados mediante un enfoque comparativo y estadístico, considerando hidrogramas, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrograma y métricas de distancia, sesgo y similitud respecto al escenario de mayor discretización espacial. Los resultados mostraron que el incremento del número de URHs produjo variaciones en los caudales simulados, aunque estas no siguieron una reducción estrictamente monotónica. Se identificó una tendencia general hacia menores diferencias respecto del escenario de 153 URHs en los niveles intermedios y altos de discretización, acompañada de oscilaciones entre

escenarios. De acuerdo con los criterios operativos adoptados, el escenario de 17 URHs fue el primero que alcanzó la estabilización, condición que se mantuvo en los escenarios de 35 y 65 URHs. Entre las configuraciones con menor discretización que la referencia, el escenario de 65 URHs presentó la mayor cercanía general respecto del escenario de 153 URHs durante los periodos 2016, 2017 y 2018, con valores de MRAE de 7.60 %, 3.95 % y 2.97 %, respectivamente. Los coeficientes de correlación de Pearson fueron 0.992, 0.996 y 0.997, mientras que los coeficientes de Spearman fueron 0.987, 0.987 y 0.996. Estos resultados evidenciaron un rango de estabilización de la respuesta hidrológica simulada a partir de 17 URHs, sin que las diferencias disminuyeran uniformemente con cada incremento del nivel de discretización espacial.

Palabras clave: Discretización espacial, Unidades de Respuesta Hidrológica, HEC-HMS, caudales naturales diarios, cuenca del río Huaura, estación de aforo Sayán.

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the influence of spatial discretization based on Hydrologic Response Units (HRUs) within the semi-distributed hydrological modeling of the Huaura River basin, aimed at generating simulated natural daily streamflows using HEC-HMS v.4.13.0. For this purpose, seven spatial discretization scenarios were analyzed, consisting of 3, 5, 9, 17, 35, 65, and 153 HRUs, for the periods from January to May of 2016, 2017, and 2018.

The scenarios were developed using precipitation data, a digital elevation model (DEM), land use and land cover information, and curve number (CN), which were used to represent the physical and hydrological conditions of the basin. The hydrological model configuration included the SCS Curve Number method for loss estimation, the SCS Unit Hydrograph for rainfall-runoff transformation, the Recession method for baseflow representation, and the Muskingum method for streamflow routing. The Sayán gauging station was used as a complementary and contextual hydrometric reference to compare the general magnitude and temporal behavior of the simulated streamflows. Because its records may be influenced by upstream hydraulic regulation, this information was not used for strict model calibration or validation.

The simulated natural daily streamflows were evaluated through a comparative and statistical approach, considering hydrographs, maximum flows, descriptive statistics, hydrograph volumes, and distance, bias, and similarity metrics with respect to the highest spatial discretization scenario. The results showed that increasing the number of HRUs produced variations in the simulated streamflows, although these variations did not follow a strictly monotonic reduction. A general tendency toward smaller differences with respect to the 153-

HRU scenario was identified at intermediate and high discretization levels, accompanied by fluctuations among scenarios. According to the operational criteria adopted, the 17-HRU scenario was the first to reach stabilization, and this condition was maintained in the 35- and 65-HRU scenarios. Among the configurations with lower spatial discretization than the reference, the 65-HRU scenario showed the greatest overall proximity to the 153-HRU scenario during 2016, 2017, and 2018, with MRAE values of 7.60%, 3.95%, and 2.97%, respectively. Pearson correlation coefficients were 0.992, 0.996, and 0.997, while Spearman correlation coefficients were 0.987, 0.987, and 0.996. These results indicate a stabilization range of the simulated hydrological response beginning at 17 HRUs, without a uniform reduction in differences with each increase in spatial discretization.

Keywords: Spatial discretization, Hydrologic Response Units, HEC-HMS, natural daily streamflows, Huaura River basin, Sayán gauging station.

Tabla de contenido

RESUMEN 3

ABSTRACT 5

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 19

1.1. Planteamiento del problema 20

1.2. Formulación del problema 21

1.3. Justificación de la investigación 21

1.4. Objetivos 23

1.4.1. Objetivo general 23

1.4.2. Objetivos específicos 23

1.5. Hipótesis 24

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 25

2.1. Fundamentos de Hidrología de Cuencas 25

2.1.1. Definición y componentes de una cuenca hidrográfica 25

2.1.2. Balance hídrico y ciclo hidrológico 26

2.1.3. Proceso hidrológico: precipitación, infiltración y escorrentía 27

2.2. Modelos Hidrológicos: Enfoques y Clasificación 28

2.2.1. Modelos semidistribuidos 31

2.2.2. Ventajas y limitaciones de los modelos semidistribuidos 31

2.3. Discretización Espacial en Modelos Hidrológicos 32

2.3.1. Concepto y objetivos de la discretización espacial 34

2.3.2. Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) y su influencia en el desempeño del modelo 35

2.3.3. Criterios para la discretización de subcuencas 38

2.3.4. Estudios previos sobre discretización espacial y modelamiento hidrológico con HEC-HMS 39

2.4. Métodos de Transformación Lluvia-Escorrentía 41

2.4.1. Método del Número de Curva (SCS-CN) 42
2.4.2. Hidrograma Unitario del SCS 45
2.5. Tránsito de Avenidas y Flujo Base 48
2.5.1. Método Muskingum: fundamentos y aplicación en HEC-HMS 49
2.5.2. Caudal base: definición, fuentes y métodos de estimación 52
2.5.3. Importancia en la simulación de hidrogramas 56
2.6. Evaluación estadística y comparativa de resultados hidrológicos simulados 57
2.6.1. Métricas de distancia y sesgo entre series hidrológicas 59
2.6.2. Métricas de similitud, correlación y desempeño complementario 62
2.7. Software HEC-HMS: aplicaciones y limitaciones 67
2.7.1. Componentes físicos y de configuración en HEC-HMS 69
2.7.2. Integración con herramientas geoespaciales: QGIS y Python 70
2.8. Marco conceptual 71
2.8.1. Definiciones operacionales 72
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 78
3.1. Tipo y diseño de la investigación 78
3.1.1. Tipo de investigación 78
3.1.2. Diseño de investigación 78
3.2. Área de estudio 80
3.2.1. Ubicación geográfica 80
3.2.2. Estación hidrométrica de referencia 81
3.2.3. Delimitación de la cuenca 82
3.3. Unidad de análisis, población y muestra 82
3.3.1. Unidad de análisis 82
3.3.2. Población 83
3.3.3. Muestra 83
3.4. Variables de investigación 84

3.4.1. Variable independiente 84
3.4.2. Variable dependiente 84
3.4.3. Indicadores de evaluación 85
3.5. Fuentes de información y datos de entrada 89
3.5.1. Información hidrometeorológica 93
3.5.2. Información topográfica 94
3.5.3. Información de uso y cobertura del suelo 95
3.6. Procesamiento de datos hidrometeorológicos 95
3.6.1. Control de calidad y consistencia 95
3.6.2. Procesamiento de precipitación 96
3.6.3. Procesamiento de caudales 97
3.6.4. Obtención del volumen observado en Sayán y limitaciones de la referencia hidrométrica 97
3.6.5. Distribución espacial de la precipitación 99
3.7. Procesamiento geoespacial y generación de URHs 102
3.7.1. Delimitación de la cuenca 102
3.7.2. Cálculo de parámetros morfométricos 102
3.7.3. Estimación del Número de Curva 104
3.7.4. Generación de escenarios de discretización espacial 104
3.8. Automatización y organización de datos mediante Python 109
3.8.1. Procesamiento de datos hidrometeorológicos 109
3.8.2. Procesamiento de información geoespacial 109
3.8.3. Organización y sistematización de resultados 109
3.9. Configuración del modelo hidrológico en HEC-HMS 110
3.9.1. Modelo de cuenca 112
3.9.2. Modelo meteorológico 113
3.9.3. Método de pérdidas 113

3.9.4. Transformación lluvia-escorrentía 113
3.9.5. Flujo base 114
3.9.6. Tránsito de caudales 115
3.9.7. Especificaciones de control 116
3.10. Evaluación comparativa y análisis estadístico de los escenarios de discretización espacial 117
3.10.1. Contraste hidrométrico complementario con la estación Sayán 117
3.10.2. Métricas de distancia respecto al escenario de 153 URHs 118
3.10.3. Coherencia hidrológica de los hidrogramas 118
3.10.4. Criterio operativo de estabilización 119
3.11. Análisis comparativo de los escenarios de discretización espacial 121
3.11.1. Comparación de hidrogramas 121
3.11.2. Comparación de volúmenes 122
3.11.3. Análisis de sensibilidad y estabilización de resultados frente al número de URHs 122
3.12. Procedimiento metodológico general 123
3.12.1. Recopilación de información 124
3.12.2. Procesamiento hidrometeorológico 124
3.12.3. Procesamiento geoespacial 124
3.12.4. Construcción de escenarios 124
3.12.5. Configuración y ejecución del modelo 125
3.12.6. Evaluación y comparación de resultados 125
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 126
4.1. Comparación de hidrogramas observados y simulados 126
4.2. Análisis descriptivo de caudales y volúmenes simulados por escenarios 130
4.3. Contraste estadístico complementario con la estación de aforo Sayán 138
4.4. Análisis de sensibilidad respecto al escenario de 153 URHs 141
4.5. Evaluación de la estabilización de resultados frente al número de URHs 147

4.6. Discusión general de resultados 149
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 153
5.1. Conclusiones 153
5.1.1. Contrastación de la hipótesis 153
5.1.2. Conclusiones según los objetivos específicos 154
5.2. Contribuciones al manejo de recursos hídricos en la cuenca del río Huaura 156
5.3. Limitaciones de la investigación 158
5.4. Recomendaciones para futuras investigaciones 161
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 165
ANEXOS 170

Lista de tablas

Tabla 1 Comparación general entre modelos hidrológicos agregados, semidistribuidos y distribuidos 29
Tabla 2 Síntesis de las métricas estadísticas consideradas en la evaluación de las series hidrológicas 65
Tabla 3 Matriz de operacionalización de las variables de investigación 86
Tabla 4 Fuentes de información y datos de entrada utilizados en la investigación 90
Tabla 5 Características de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en la investigación ... 93
Tabla 6 Características generales de los escenarios de discretización espacial 108
Tabla 7 Métodos empleados en la configuración de HEC-HMS 112
Tabla 8 Criterios operativos para evaluar la estabilización de la respuesta hidrológica simulada 121
Tabla 9 Resumen de caudales máximos por escenario de discretización espacial 130
Tabla 10 Resumen de volúmenes por escenario de discretización espacial 133
Tabla 11 Estadísticos descriptivos de los caudales diarios simulados por escenario de discretización espacial 135
Tabla 12 Contraste estadístico complementario entre la estación Sayán y los escenarios simulados 138
Tabla 13 Métricas de distancia, sesgo y similitud respecto al escenario de 153 URHs 141

Lista de figuras

Figura 1 Representación esquemática de diferentes niveles de discretización espacial de una cuenca 34
Figura 2 Representación conceptual de la delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica en una cuenca hipotética 37
Figura 3 Representación conceptual de los parámetros temporales del Hidrograma Unitario del SCS 46
Figura 4 Representación conceptual del almacenamiento prismático y en cuña en el método Muskingum 50
Figura 5 Representación conceptual del origen y aporte del caudal base a la red de drenaje 54
Figura 6 Ubicación geográfica de la cuenca del río Huaura y de la estación de aforo Sayán 81
Figura 7 Principales insumos geoespaciales empleados en la caracterización hidrológica de la cuenca del río Huaura 92
Figura 8 Distribución espacial de la precipitación mediante interpolación IDW en la cuenca del río Huaura 101
Figura 9 Discretización espacial por escenarios de URHs 106
Figura 10 Resumen metodológico de la configuración de los modelos hidrológicos semidistribuidos en HEC-HMS 111
Figura 11 Procedimiento metodológico general de la investigación 123
Figura 12 Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016 127
Figura 13 Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2017 128
Figura 14 Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2018 129
Figura 15 Variación del caudal máximo simulado según el número de URHs para los años 2016, 2017 y 2018 132
Figura 16 Variación del volumen simulado según el número de URHs para los años 2016, 2017 y 2018 134

Figura 17 Variación de los estadísticos descriptivos de los caudales diarios simulados según el número de URHs en los periodos 2016, 2017 y 2018 136
Figura 18 Métricas de diferencia, sesgo y similitud de los caudales diarios simulados respecto al escenario de 153 URHs para los años 2016, 2017 y 2018 143

Lista de anexos

Anexo A. Información hidrometeorológica utilizada 170

Anexo B. Procesamiento geoespacial de la cuenca 176

Anexo C. Escenarios de discretización espacial en URHs 181

Anexo D. Configuración del modelo HEC-HMS 203

Anexo E. Resultados complementarios de simulación 205

Anexo F. Cálculos estadísticos y procesamiento en Python 211

Anexo G. Matriz de alineamiento metodológico 216

Lista de tablas de anexos

Tabla A1 Características de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en la investigación 170

Tabla A2 Disponibilidad de registros diarios por estación durante los periodos de simulación 171

Tabla A3 Precipitación mensual acumulada por estación durante los periodos de simulación . 173

Tabla A4 Resumen hidrométrico de la estación Sayán durante los periodos de análisis 174

Tabla A5 Resumen del control estadístico y verificación de las series de precipitación utilizadas en HEC-HMS 175

Tabla B1 Distribución de áreas por rangos de elevación en la cuenca del río Huaura 177

Tabla B2 Distribución de áreas por rangos de pendiente en la cuenca del río Huaura 178

Tabla B3 Distribución de áreas por uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Huaura..... 179

Tabla B4 Distribución de áreas por rango de Número de Curva en la cuenca del río Huaura..... 180

Tabla B5 Resumen de insumos geoespaciales empleados en el procesamiento hidrológico de la cuenca 180

Tabla C1 Resumen general de los escenarios de discretización espacial en URHs 181

Tabla C2 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 3 URHs 185

Tabla C3 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 3 URHs 185

Tabla C4 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 3 URHs 186

Tabla C5 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 5 URHs 186

Tabla C6 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 5 URHs 187

Tabla C7 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 5 URHs 187

Tabla C8 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 9 URHs 187

Tabla C9 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 9 URHs 188

Tabla C10 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 9 URHs 188

Tabla C11 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 17 URHs 189

Tabla C12 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 17 URHs 190

Tabla C13 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 17 URHs 190

Tabla C14 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 35 URHs 191

Tabla C15 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 35 URHs 192

Tabla C16 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 35 URHs 192

Tabla C17 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 65 URHs 193

Tabla C18 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 65 URHs 195

Tabla C19 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 65 URHs 195

Tabla C20 Características físicas y geomorfológicas del escenario de 153 URHs 196

Tabla C21 Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 153 URHs 200

Tabla C22 Características físicas de la red de drenaje del escenario de 153 URHs 201

Tabla D1 Resumen de componentes del modelo de cuenca por escenario 203

Tabla D2 Parámetros del método Recession para flujos base 204

Tabla D3 Parámetros del método Muskingum para la red de drenaje por escenario de discretización 204

Tabla D4 Resumen del tiempo de retardo y configuración del hidrograma unitario SCS por escenario de discretización 205

Tabla E1 Relación de simulaciones hidrológicas ejecutadas en HEC-HMS 206

Tabla E2 Fechas de ocurrencia de los caudales máximos simulados por escenario 206

Tabla E3 Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2016 207

Tabla E4 Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2017 207

Tabla E5 Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2018 207

Tabla E6 Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2016 207

Tabla E7 Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2017 208

Tabla E8 Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2018 208

Tabla E9 Diferencia porcentual mensual de los volúmenes simulados respecto al escenario de 153 URHs 210

Tabla F1 Archivos de entrada y salida empleados en el procesamiento estadístico 213

Tabla F2 Variables generadas durante el procesamiento de las series diarias 213

Tabla F3 Criterios de depuración y validación aplicados a las series de caudales 214

Tabla F4 Correspondencia entre cálculos realizados en Python y productos presentados en la tesis 214

Tabla G1 Matriz de alineamiento entre problema, objetivos, hipótesis, procedimientos, resultados y conclusiones 216

Lista de figuras de anexos

Figura A1 Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca del río Huaura 171

Figura A2 Disponibilidad de registros diarios hidrometeorológicos durante los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018 172

Figura A3 Precipitación mensual acumulada por estación durante los periodos de simulación 174

Figura A4 Hidrogramas observados en la estación Sayán durante los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018 175

Figura B1 Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca del río Huaura 176

Figura B2 Mapa de pendientes de la cuenca del río Huaura 177

Figura B3 Uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Huaura 178

Figura B4 Número de Curva de la cuenca del río Huaura 179

Figura C1 Escenario de discretización espacial de 3 URHs 182

Figura C2 Escenario de discretización espacial de 5 URHs 182

Figura C3 Escenario de discretización espacial de 9 URHs 183

Figura C4 Escenario de discretización espacial de 17 URHs 183

Figura C5 Escenario de discretización espacial de 35 URHs 184

Figura C6 Escenario de discretización espacial de 65 URHs 184

Figura C7 Escenario de discretización espacial de 153 URHs 185

Figura E1 Curvas de volumen acumulado simulado durante 2016 209

Figura E2 Curvas de volumen acumulado simulado durante 2017 209

Figura E3 Curvas de volumen acumulado simulado durante 2018 210

Figura F1 Flujo de procesamiento estadístico realizado en Python 212

Figura F2 Estructura de organización de archivos del procesamiento en Python 215

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La representación espacial de una cuenca hidrográfica constituye un aspecto determinante dentro del modelamiento hidrológico, debido a que influye en la forma en que se simulan los procesos de precipitación, infiltración, escorrentía y generación de caudales. En este contexto, los modelos semidistribuidos permiten dividir la cuenca en unidades menores para representar la variabilidad física e hidrológica del territorio, manteniendo un equilibrio entre el nivel de detalle espacial y la simplicidad del modelo. Esta forma de representación resulta importante porque permite incorporar diferencias espaciales asociadas al relieve, uso y cobertura del suelo, pendiente y parámetros hidrológicos dentro del proceso de simulación (Puche et al., 2025).

La discretización espacial mediante Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) permite agrupar áreas con características similares de suelo, cobertura, pendiente y condiciones hidrológicas, facilitando la asignación diferenciada de parámetros dentro del modelo. Sin embargo, una mayor cantidad de unidades no garantiza necesariamente una mejora en los resultados, debido a que también puede incrementar la cantidad de parámetros, el tiempo de procesamiento y la complejidad en la definición y ajuste de parámetros (Poblete et al., 2020).

El software HEC-HMS es una herramienta utilizada para simular procesos de precipitación-escorrentía mediante la integración de métodos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía, flujo base y tránsito de caudales. Su aplicación requiere definir una estructura espacial coherente con las características de la cuenca y con la información hidrometeorológica disponible (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

En ese sentido, la presente investigación evaluó la influencia de diferentes niveles de discretización espacial en URHs dentro del modelamiento hidrológico de la cuenca del río

Huaura para la generación de caudales naturales diarios simulados mediante HEC-HMS v.4.13.0. Para ello, se analizaron siete escenarios conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, cuyos resultados fueron evaluados mediante un análisis comparativo y estadístico orientado a identificar la variación de los caudales naturales diarios simulados frente al incremento del nivel de discretización espacial. La información hidrométrica disponible en la estación de aforo Sayán fue utilizada como referencia complementaria para contrastar la magnitud general y el comportamiento temporal de los resultados simulados, considerando la posible influencia de regulación hidráulica aguas arriba.

1.1. Planteamiento del problema

Los modelos hidrológicos permiten representar la respuesta de una cuenca frente a diferentes condiciones de precipitación, infiltración, escorrentía y tránsito de caudales. Su utilidad en la estimación de caudales y en el análisis hidrológico depende no solo de los métodos de cálculo seleccionados, sino también de la forma en que se representa espacialmente la cuenca dentro del modelo (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

En modelos semidistribuidos, el problema principal se presenta al definir el nivel de discretización espacial más adecuado. Una discretización muy general puede simplificar en exceso las características reales del terreno, mientras que una discretización demasiado detallada puede incrementar la cantidad de parámetros y la complejidad del modelo sin garantizar mejoras relevantes en los resultados. Por ello, la subdivisión de una cuenca puede influir en la estimación de caudales, en la representación espacial de la precipitación y en los procesos de infiltración y escorrentía (Barbosa et al., 2019).

En la cuenca del río Huaura, esta problemática adquiere importancia debido a la necesidad de analizar la relación entre precipitación y caudal, considerando que antecedentes recientes han abordado el pronóstico del caudal de esta cuenca a partir de información de

precipitación (Cipriano Bautista, 2024). Asimismo, desde el enfoque del modelamiento hidrológico, la representación espacial de una cuenca puede influir en los caudales simulados, la forma de los hidrogramas, el tiempo de respuesta y la interpretación de la dinámica hidrológica del sistema, por lo que resulta pertinente evaluar distintos niveles de discretización espacial en el proceso de simulación (Barbosa et al., 2019).

Por lo tanto, el problema de investigación se centró en evaluar si el incremento del número de Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) dentro del modelo hidrológico semidistribuido de la cuenca del río Huaura generaba variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados y en los volúmenes bajo los hidrogramas. Para ello, se consideraron siete escenarios de discretización espacial conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, modelados mediante HEC-HMS v.4.13.0 y evaluados mediante indicadores descriptivos, métricas de similitud, métricas de distancia y análisis de sensibilidad respecto al escenario de mayor discretización espacial. La estación de aforo Sayán fue considerada como referencia hidrométrica complementaria, debido a que sus registros pueden estar influenciados por regulación hidráulica aguas arriba.

1.2. Formulación del problema

De acuerdo con el planteamiento desarrollado, la presente investigación respondió la siguiente interrogante:

¿De qué manera influye el nivel de discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica en la generación de caudales naturales diarios simulados de la cuenca del río Huaura mediante HEC-HMS v.4.13.0, considerando el análisis comparativo y estadístico de los escenarios de discretización espacial?

1.3. Justificación de la investigación

La presente investigación se justificó porque abordó un aspecto crítico del modelamiento

hidrológico semidistribuido: la selección del nivel de discretización espacial. En cuencas con variabilidad física e hidrológica, la forma en que se divide el territorio puede modificar la representación de la precipitación, la infiltración, la escorrentía, los caudales simulados y la forma de los hidrogramas (Steinmetz et al., 2019).

Desde el punto de vista técnico, el estudio permitió evaluar si una mayor cantidad de URHs mejora la representación física e hidrológica de la cuenca o si incrementa la complejidad del modelo sin generar mejoras sustanciales en los resultados. Este análisis resultó relevante porque una discretización excesiva puede aumentar el número de parámetros y la complejidad en la definición y ajuste de parámetros, sin asegurar un mejor desempeño del modelo (Poblete et al., 2020).

Desde el punto de vista metodológico, la investigación comparó siete escenarios de discretización espacial conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, configurados mediante HEC-HMS v.4.13.0. La comparación se realizó mediante el análisis de hidrogramas simulados, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, coeficientes de correlación y métricas de distancia respecto al escenario de mayor discretización espacial. Este enfoque permitió evaluar la sensibilidad de la respuesta hidrológica simulada frente al incremento del número de URHs, sin asumir una calibración estricta frente a una serie observada que puede estar influenciada por regulación hidráulica.

Desde el punto de vista aplicado, la investigación proporciona evidencia metodológica sobre la sensibilidad de los caudales naturales diarios simulados frente al nivel de discretización espacial y constituye una base preliminar para estudios hidrológicos posteriores en la cuenca del río Huaura. Debido a que el modelo no fue calibrado ni validado estrictamente con una serie hidrométrica representativa del régimen natural y no incorporó explícitamente la operación de la infraestructura hidráulica existente, los resultados no deben utilizarse directamente para el

diseño de obras, la determinación oficial de la disponibilidad hídrica, la asignación del recurso ni la adopción de decisiones operativas. Tales aplicaciones requerirían representar la regulación hidráulica y efectuar procesos de calibración y validación con información hidrométrica adecuada.

1.4. Objetivos

Los objetivos de la presente investigación se orientaron a evaluar la influencia de la discretización espacial en URHs dentro del modelamiento hidrológico semidistribuido de la cuenca del río Huaura, con énfasis en la comparación de caudales naturales diarios simulados, volúmenes bajo hidrogramas y métricas de distancia, sesgo y similitud mediante HEC-HMS v.4.13.0.

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del nivel de discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura para la generación de caudales naturales diarios simulados, empleando HEC-HMS v.4.13.0 y aplicando un análisis comparativo y estadístico entre los escenarios de discretización espacial, con apoyo de la información hidrométrica disponible en la estación de aforo Sayán como referencia complementaria.

1.4.2. Objetivos específicos

1) Delimitar y caracterizar las Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) en la cuenca del río Huaura, a partir del modelo digital de elevaciones (DEM), uso y cobertura del suelo, número de curva (CN) y parámetros morfométricos relevantes, para establecer los escenarios de discretización espacial.
2) Procesar y evaluar la calidad y consistencia de los datos hidrometeorológicos de precipitación y caudal registrados en las estaciones del área de estudio, con el

propósito de generar insumos confiables para el modelamiento hidrológico.

3) Configurar y ejecutar en HEC-HMS v.4.13.0 los modelos hidrológicos semidistribuidos correspondientes a los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, incorporando los parámetros físicos e hidrológicos de la cuenca para generar los caudales naturales diarios simulados.
4) Comparar los caudales naturales diarios simulados en los diferentes escenarios de discretización espacial mediante el análisis de hidrogramas, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas y métricas de similitud y distancia respecto al escenario de mayor discretización espacial.
5) Evaluar la influencia de la discretización espacial en la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada y en la consistencia de los resultados simulados de la cuenca del río Huaura, determinando si el incremento del número de URHs genera variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados y en los volúmenes bajo los hidrogramas.

1.5. Hipótesis

La hipótesis de la presente investigación planteó que la discretización espacial de la cuenca del río Huaura en 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs), mediante el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS v.4.13.0, genera variaciones en los caudales naturales diarios simulados y que, en los escenarios de discretización intermedia y alta, existe una tendencia general hacia menores diferencias respecto del escenario de 153 URHs. Esta tendencia no implica una disminución estrictamente monotónica, debido a que pueden presentarse oscilaciones entre los diferentes niveles de discretización espacial.

Esta hipótesis permitió evaluar si el incremento del nivel de discretización espacial modificó la respuesta hidrológica de la cuenca, considerando como criterios principales los

hidrogramas simulados, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, métricas de similitud y métricas de distancia respecto al escenario de mayor discretización espacial.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos de Hidrología de Cuencas

La hidrología de cuencas estudia el comportamiento del agua dentro de un territorio delimitado naturalmente, considerando procesos como la precipitación, infiltración, escorrentía, almacenamiento y tránsito de caudales (Chow et al., 1994). En una cuenca hidrográfica, el agua proveniente de la lluvia, deshielo o aportes subterráneos se desplaza hacia un punto común de salida, el cual puede estar representado por un río, lago, embalse o estación de aforo. En ese sentido, la cuenca constituye una unidad territorial fundamental para el análisis hidrológico y para la gestión integrada de los recursos hídricos, debido a que permite relacionar las características físicas del terreno con la generación de caudales y la respuesta frente a eventos de precipitación (Aguirre Núñez, 2011).

2.1.1. Definición y componentes de una cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como el área natural del territorio cuyas aguas provenientes de la precipitación, escorrentía superficial y aportes subterráneos drenan hacia un punto común de salida, el cual puede estar representado por un río, lago, embalse, océano o estación de aforo. Esta unidad se encuentra delimitada por divisorias de aguas, las cuales separan el escurrimiento superficial que pertenece a una cuenca del que corresponde a otra. En ese sentido, la cuenca hidrográfica constituye una unidad física fundamental para el análisis, planificación y gestión de los recursos hídricos, debido a que permite relacionar el comportamiento del agua con las características propias del territorio (Vásquez Villanueva et al., 2016).

Dentro de sus componentes principales se encuentran el cauce principal, los afluentes, las subcuencas, las divisorias de aguas, las pendientes, la cobertura del suelo, las zonas de infiltración y las áreas de almacenamiento superficial y subterráneo. Estos elementos permiten comprender la forma en que el agua se desplaza dentro de la cuenca, desde las zonas de mayor elevación hasta el punto de descarga. Asimismo, la red de drenaje, la topografía, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la geología influyen directamente en los procesos de infiltración, escorrentía, almacenamiento y generación de caudales (Vásquez Villanueva et al., 2016).

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca no debe entenderse únicamente como una superficie de captación, sino como un sistema físico en el cual interactúan procesos de entrada, almacenamiento, transformación y salida de agua. Por ello, su caracterización física e hidrológica resulta necesaria para estimar caudales, evaluar la disponibilidad hídrica y desarrollar modelos hidrológicos capaces de representar de manera adecuada su comportamiento (Healy et al., 2007).

2.1.2. Balance hídrico y ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo, mediante procesos como la evaporación, transpiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación, escorrentía superficial y flujo subterráneo. En una cuenca hidrográfica, estos procesos permiten comprender cómo el agua ingresa al sistema, se distribuye sobre el territorio, se almacena temporalmente y finalmente sale por un punto de descarga. Por ello, el ciclo hidrológico constituye una base fundamental para analizar la respuesta de una cuenca frente a la ocurrencia de precipitaciones y para interpretar la generación de caudales en el tiempo (Chow et al., 1994).

El balance hídrico permite representar la relación entre las entradas, salidas y variaciones de almacenamiento dentro de una cuenca. La precipitación constituye una de las principales

entradas del sistema, mientras que la evapotranspiración, la escorrentía superficial, el flujo base y el flujo subterráneo de salida representan componentes de pérdida o descarga; por su parte, los cambios de almacenamiento expresan variaciones internas en la cantidad de agua retenida dentro de la cuenca. De esta manera, el balance hídrico permite evaluar si una cuenca presenta excedentes, déficits o variaciones en la disponibilidad de agua durante un periodo determinado (Healy et al., 2007).

En el modelamiento hidrológico, el balance hídrico es importante porque permite verificar la coherencia entre la precipitación ingresada al modelo, las pérdidas hidrológicas consideradas, la escorrentía generada y los caudales simulados en el punto de salida de la cuenca. En ese sentido, su aplicación permite analizar si los hidrogramas obtenidos representan de manera razonable el volumen de agua producido durante el periodo de estudio (Chow et al., 1994).

2.1.3. Proceso hidrológico: precipitación, infiltración y escorrentía

La precipitación es el proceso mediante el cual el agua cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, principalmente en forma de lluvia, nieve o granizo. En el modelamiento hidrológico de cuencas, la precipitación representa uno de los principales datos de entrada, debido a que su magnitud, duración, distribución temporal y distribución espacial influyen directamente en la respuesta hidrológica del sistema y en la generación de caudales (Chow et al., 1994).

La infiltración corresponde al proceso mediante el cual una parte del agua precipitada ingresa al suelo. Este proceso depende de las características físicas del suelo, la humedad antecedente, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y el uso del suelo. Cuando la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración o cuando el suelo se encuentra saturado, se genera escorrentía superficial, la cual se desplaza sobre el terreno hasta incorporarse

a la red de drenaje de la cuenca (Healy et al., 2007).

La escorrentía puede presentarse como escorrentía superficial, subsuperficial o subterránea. La escorrentía superficial se desplaza sobre la superficie del terreno; la escorrentía subsuperficial ocurre dentro de las capas superiores del suelo; y la escorrentía subterránea se encuentra relacionada con el flujo base que alimenta los cauces durante periodos sin precipitación. Estos componentes permiten comprender la forma en que el agua se transforma en caudal dentro de una cuenca hidrográfica (Chow et al., 1994).

En el modelamiento hidrológico, la precipitación, infiltración y escorrentía son procesos fundamentales para representar la transformación de la lluvia en caudal y analizar el comportamiento de los hidrogramas generados en el punto de salida de una cuenca. Esta relación constituye la base de los modelos lluvia-escorrentía, como HEC-HMS, utilizados para simular caudales a partir de información de precipitación y características físicas de la cuenca (López et al., 2012).

2.2. Modelos Hidrológicos: Enfoques y Clasificación

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas del comportamiento de una cuenca hidrográfica, utilizadas para simular procesos como la precipitación, infiltración, escorrentía, flujo base y tránsito de caudales. Estos modelos permiten analizar la respuesta hidrológica de una cuenca frente a diferentes condiciones hidrometeorológicas o escenarios de análisis, por lo que constituyen herramientas importantes para la estimación de caudales, la planificación del recurso hídrico y el análisis de eventos hidrometeorológicos (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

De acuerdo con el nivel de representación espacial, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en agregados, semidistribuidos y distribuidos. Los modelos agregados consideran la cuenca como una sola unidad de análisis y emplean parámetros promedio para representar su

comportamiento general. Los modelos distribuidos, en cambio, dividen la cuenca en celdas o elementos espaciales de mayor detalle, lo que permite representar con mayor precisión la variabilidad física e hidrológica del territorio, aunque con mayores requerimientos de información y procesamiento (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

Entre ambos enfoques se ubican los modelos semidistribuidos, los cuales constituyen una alternativa intermedia al incorporar cierto grado de diferenciación espacial sin alcanzar la complejidad de los modelos completamente distribuidos. Por ello, este enfoque resulta útil cuando se busca representar la variabilidad física de la cuenca manteniendo una estructura de modelamiento viable con la información disponible (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

Las diferencias entre los principales enfoques de modelamiento hidrológico se relacionan principalmente con el nivel de representación espacial de la cuenca, la capacidad para incorporar su heterogeneidad interna y los requerimientos de información y procesamiento. En la Tabla 1 se presenta una comparación general entre los modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos.

Tabla 1

Comparación general entre modelos hidrológicos agregados, semidistribuidos y distribuidos

Características	Modelo agregado	Modelo semidistribuido	Modelo distribuido
Representación espacial	La cuenca se representa como una sola unidad de análisis	La cuenca se divide en subcuencas o unidades espaciales diferenciadas	La cuenca se divide en celdas o elementos espaciales de alta resolución
Variabilidad espacial	Representación limitada; se emplean parámetros	Representación parcial de la heterogeneidad física e hidrológica	Representación detallada de la variabilidad espacial

Características	Modelo agregado	Modelo semidistribuido	Modelo distribuido
	promedio para toda la cuenca	mediante parámetros diferenciados	de los parámetros y procesos hidrológicos
Datos requeridos	Relativamente bajos	Moderados, dependiendo del número de unidades espaciales consideradas	Elevados, debido al nivel de detalle espacial requerido
Cantidad de parámetros	Baja	Intermedia y dependiente del nivel de discretización espacial	Alta, debido al elevado número de elementos espaciales representados
Demanda computacional	Baja	Intermedia	Alta
Complejidad de configuración	Baja	Moderada	Alta
Aplicación general	Estudios en los que interesa representar la respuesta global de la cuenca	Estudios que requieren incorporar variabilidad espacial manteniendo una estructura de modelamiento manejable	Estudios que requieren representar detalladamente procesos y variables distribuidas en el espacio
Relación con la presente investigación	No corresponde al enfoque adoptado	Enfoque empleado para evaluar diferentes niveles de discretización espacial mediante URHs	No corresponde al enfoque adoptado

Nota. Elaboración propia a partir de Gomariz Castillo y Alonso Sarría (2018), Beven (2012) y Savvidou et al. (2018).

De acuerdo con estas características, los modelos semidistribuidos constituyen una alternativa intermedia que permite incorporar diferencias espaciales dentro de la cuenca sin alcanzar los requerimientos de información y procesamiento propios de los modelos completamente distribuidos. Este enfoque resulta coherente con la presente investigación, debido a que permite analizar la influencia de diferentes niveles de discretización espacial mediante Unidades de Respuesta Hidrológica.

2.2.1. Modelos semidistribuidos

Los modelos semidistribuidos representan la cuenca mediante unidades espaciales diferenciadas, a las cuales se asignan parámetros hidrológicos según las características físicas de cada zona. A diferencia de los modelos agregados, este enfoque permite considerar que no toda la cuenca responde de manera uniforme frente a la precipitación, debido a que existen variaciones en el relieve, el uso y cobertura del suelo, la pendiente, la capacidad de infiltración y la distribución espacial de la lluvia (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

En este tipo de modelos, los procesos hidrológicos se estiman en cada unidad espacial, considerando componentes como pérdidas por infiltración, precipitación efectiva, transformación lluvia-escorrentía, flujo base y tránsito de caudales. Posteriormente, los hidrogramas generados en las distintas unidades son integrados dentro de la red de drenaje hasta obtener la respuesta hidrológica en el punto de salida de la cuenca. Esta estructura permite representar la generación de caudales incorporando la variabilidad espacial de la cuenca, sin alcanzar la complejidad de los modelos completamente distribuidos (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

2.2.2. Ventajas y limitaciones de los modelos semidistribuidos

Los modelos semidistribuidos presentan como principal ventaja el equilibrio entre simplicidad y representación espacial. A diferencia de los modelos agregados, permiten

considerar la variabilidad física e hidrológica de la cuenca; y, a diferencia de los modelos distribuidos, requieren menor cantidad de datos, menor tiempo computacional y menor complejidad en la definición y ajuste de parámetros. Por ello, este enfoque resulta adecuado en estudios donde se busca representar la respuesta hidrológica de una cuenca con un nivel de detalle razonable y con información disponible para el modelamiento (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

Sin embargo, estos modelos también presentan limitaciones que deben ser consideradas durante su aplicación. El desempeño de los resultados simulados depende de la calidad de los datos de entrada, de la definición de los parámetros, de la representación espacial de las variables hidrológicas y del nivel de discretización adoptado. En ese sentido, una representación inadecuada de la cuenca puede generar incertidumbre en los caudales simulados y afectar la interpretación de los hidrogramas obtenidos (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

Una limitación importante de los modelos semidistribuidos se relaciona con la forma en que se define la representación espacial de la cuenca. Una subdivisión insuficiente puede reducir la capacidad del modelo para representar la variabilidad física e hidrológica del territorio, mientras que una subdivisión excesiva puede incrementar la cantidad de parámetros y la complejidad del modelamiento. Por ello, el desempeño de este tipo de modelos depende de la coherencia entre la discretización adoptada, la calidad de los datos de entrada y los objetivos del análisis hidrológico (Poblete et al., 2020).

2.3. Discretización Espacial en Modelos Hidrológicos

La discretización espacial en modelos hidrológicos consiste en dividir una cuenca hidrográfica en unidades menores, con la finalidad de representar de manera más adecuada sus características físicas e hidrológicas. Esta división puede realizarse mediante subcuencas, celdas, elementos de malla o Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs), dependiendo del tipo

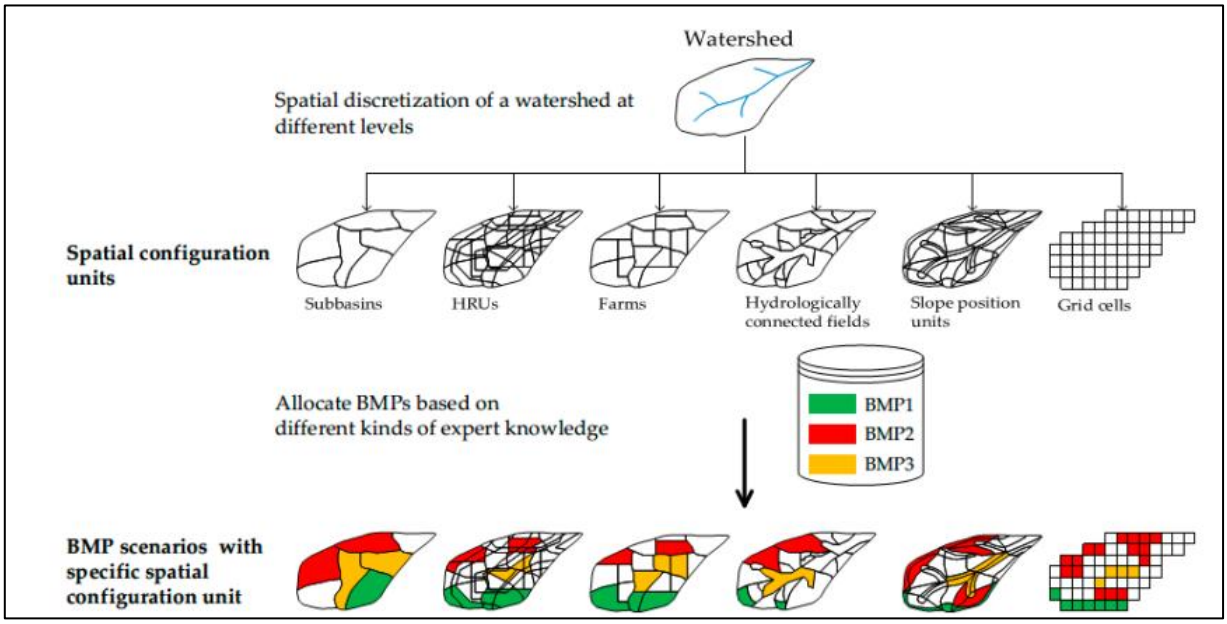
de modelo, la información disponible y el nivel de detalle requerido para el análisis. Este proceso permite incorporar la variabilidad espacial del territorio, considerando factores como el relieve, el uso y cobertura del suelo, la pendiente, la red de drenaje y la distribución espacial de la precipitación (Puche et al., 2025).

En los modelos hidrológicos semidistribuidos, la discretización espacial resulta importante porque permite asignar parámetros diferenciados a cada unidad de análisis. De esta manera, la respuesta hidrológica de la cuenca no se representa como si todo el territorio tuviera condiciones uniformes, sino considerando la existencia de zonas con distinta capacidad de infiltración, generación de escorrentía y tiempo de respuesta. Por ello, el nivel de discretización adoptado puede influir en la forma del hidrograma, en los caudales simulados y en la representación temporal de la respuesta hidrológica de la cuenca (Steinmetz et al., 2019).

La selección del nivel de discretización espacial, ver Figura 1, constituye una decisión conceptual relevante dentro del modelamiento hidrológico, ya que condiciona la forma en que se representa la heterogeneidad física de la cuenca. Este nivel de representación debe guardar relación con la escala del análisis, la disponibilidad de información y las características espaciales de las variables hidrológicas consideradas. En ese sentido, la discretización espacial permite establecer un equilibrio entre la simplificación del sistema hidrológico y la representación diferenciada de los procesos que intervienen en la generación de caudales. Asimismo, contribuye a representar de manera adecuada la variabilidad espacial y los procesos hidrológicos dominantes presentes en la cuenca, favoreciendo una descripción más realista de su comportamiento hidrológico (Poblete et al., 2020) y permitiendo incorporar de forma diferenciada las características físicas y espaciales que influyen en la respuesta hidrológica del sistema (Puche et al., 2025).

Figura 1

Representación esquemática de diferentes niveles de discretización espacial de una cuenca



Nota. Adaptado de Zhu et al. (2019).

2.3.1. Concepto y objetivos de la discretización espacial

La discretización espacial se define como el proceso mediante el cual una cuenca hidrográfica se subdivide en unidades menores para facilitar su representación dentro de un modelo hidrológico. Esta subdivisión permite organizar espacialmente las características físicas e hidrológicas de la cuenca, tales como el relieve, la pendiente, la red de drenaje, el uso y cobertura del suelo, el tipo de suelo y la distribución espacial de la precipitación. De esta manera, el modelo no representa a la cuenca como una unidad homogénea, sino como un sistema compuesto por áreas con condiciones diferenciadas que influyen en la respuesta hidrológica (Puche et al., 2025).

Uno de los objetivos principales de la discretización espacial es representar la heterogeneidad física de la cuenca, con la finalidad de asignar parámetros hidrológicos de

acuerdo con las condiciones propias de cada unidad de análisis. En ese sentido, las Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) permiten agrupar áreas que presentan características similares de clima, uso y cobertura del suelo, tipo de suelo, pendiente y otros parámetros relacionados con la generación de escorrentía, bajo el supuesto de que cada unidad tiene una respuesta hidrológica relativamente homogénea frente a una condición meteorológica determinada (Poblete et al., 2020).

Asimismo, la discretización espacial permite interpretar cómo diferentes niveles de detalle pueden influir en la forma del hidrograma, los caudales simulados y los tiempos de respuesta de la cuenca. Por ello, la discretización no debe entenderse únicamente como una división geométrica del área de estudio, sino como una decisión técnica que puede modificar la representación del comportamiento hidrológico del sistema (Steinmetz et al., 2019).

De esta manera, la discretización espacial cumple una función conceptual y operativa dentro del modelamiento hidrológico, ya que permite transformar la complejidad física de una cuenca en unidades de análisis que pueden ser representadas mediante parámetros hidrológicos diferenciados. Esta idea se sustenta en el enfoque de los modelos hidrológicos distribuidos, los cuales permiten incorporar la variabilidad espacial de los parámetros de la cuenca, de las entradas hidrometeorológicas y de la respuesta hidrológica simulada (Abbott et al., 1986).

2.3.2. Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) y su influencia en el desempeño del modelo

Las Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) son unidades espaciales utilizadas en modelos hidrológicos semidistribuidos, definidas bajo el supuesto de que cada unidad presenta condiciones relativamente homogéneas y una respuesta hidrológica similar frente a una condición meteorológica determinada. Estas unidades permiten representar de manera diferenciada los procesos hidrológicos dentro de una cuenca, evitando asumir que todo el

territorio responde de forma uniforme frente a la precipitación, la temperatura y otras variables climáticas (Poblete et al., 2020).

Las URHs pueden definirse a partir de la combinación de variables como uso y cobertura del suelo, tipo hidrológico del suelo, pendiente, elevación, precipitación y otros datos de entrada espacialmente distribuidos. De esta manera, permiten agrupar áreas con comportamiento hidrológico relativamente similar y facilitan la asignación de parámetros diferenciados dentro de un modelo semidistribuido (Puche et al., 2025).

En su concepción clásica, una Unidad de Respuesta Hidrológica representa un área caracterizada por una combinación relativamente homogénea de factores como uso y cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente (Arnold et al., 1998). Estas unidades permiten incorporar espacialmente características diferenciadas que condicionan la respuesta hidrológica de una cuenca (Poblete et al., 2020). Debido a su forma de definición, no necesariamente coinciden con subcuencas delimitadas por divisorias topográficas ni constituyen elementos explícitos de una red de drenaje.

En HEC-HMS, el elemento espacial encargado de representar la generación de escorrentía se denomina Subbasin. Este elemento corresponde a un área tributaria delimitada espacialmente y conectada a un punto de salida, dentro de la cual se aplican los métodos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía y flujo base (U.S. Army Corps of Engineers, 2026). Por tanto, una URH clásica y un elemento Subbasin no son conceptos universalmente equivalentes.

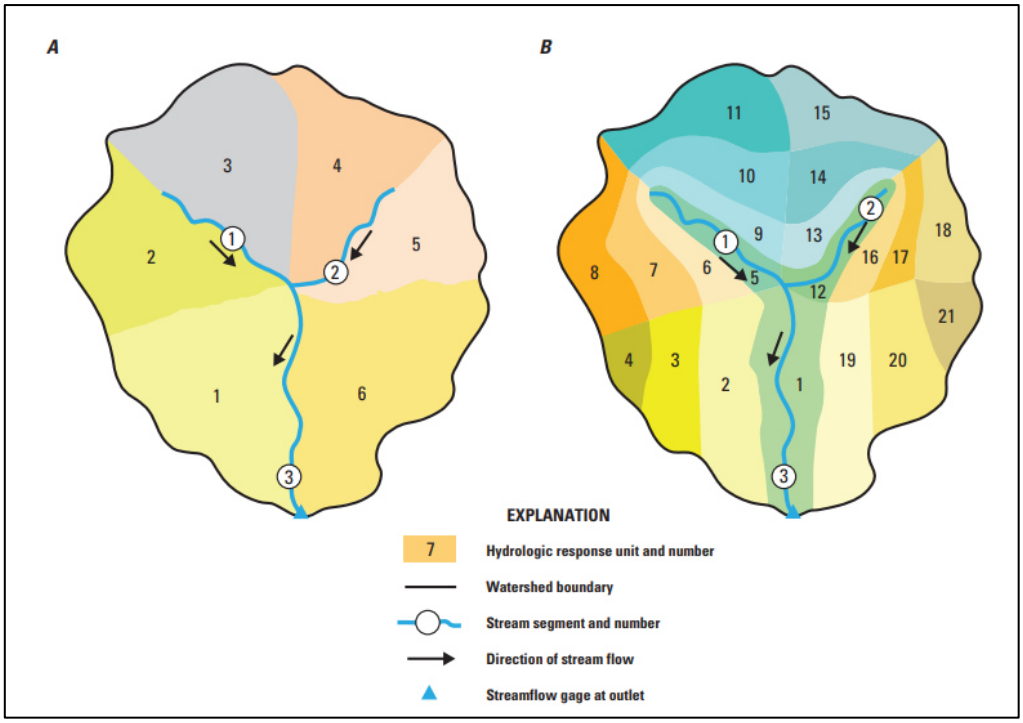
El número de URHs adoptado en un modelo hidrológico puede influir en la representación espacial de la cuenca, ya que modifica la forma en que se incorporan las características del suelo, el uso y la cobertura del suelo, la pendiente, la elevación, la precipitación y otros parámetros espacialmente distribuidos (Poblete et al., 2020). Por ello, la

definición de URHs debe buscar un equilibrio entre la representación de la heterogeneidad territorial y la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente los procesos hidrológicos de interés (Puche et al., 2025).

Las Unidades de Respuesta Hidrológica constituyen unidades espaciales utilizadas para representar la variabilidad interna de una cuenca mediante la agrupación o delimitación de áreas con características hidrológicas diferenciadas. Su configuración puede considerar atributos topográficos, climáticos y de vegetación, entre otras propiedades físicas que condicionan la respuesta hidrológica. La Figura 2 muestra conceptualmente cómo una cuenca hipotética puede ser discretizada en URHs a partir de diferentes criterios espaciales.

Figura 2

Representación conceptual de la delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica en una cuenca hipotética



Nota. Tomado de Markstrom et al. (2015).

La definición de estas unidades determina el nivel de detalle con el que se representa la heterogeneidad espacial de la cuenca. Por ello, la cantidad y configuración de las URHs puede influir en la estructura del modelo, el número de parámetros y la respuesta hidrológica simulada.

2.3.3. Criterios para la discretización de subcuencas

La discretización de subcuencas debe considerar criterios físicos, hidrológicos y operativos que permitan representar el comportamiento espacial de la cuenca. Entre los criterios físicos se encuentran el relieve, la pendiente, la red de drenaje, la forma de la cuenca, la distribución altitudinal y la dirección predominante del flujo. Estos elementos permiten definir unidades espaciales coherentes con la acumulación del agua y con la forma en que la escorrentía se desplaza hacia el punto de salida de la cuenca (Barbosa et al., 2019).

Desde el punto de vista hidrológico, la discretización debe considerar la distribución espacial de la precipitación, el uso y cobertura del suelo, el tipo de suelo, el número de curva (CN), el tiempo de concentración y la capacidad de infiltración. Estos parámetros permiten diferenciar zonas con mayor o menor tendencia a generar escorrentía y ayudan a representar la respuesta hidrológica de cada unidad de análisis. En HEC-HMS, la subdivisión de la cuenca permite aprovechar mejor la información espacial de precipitación y representar condiciones heterogéneas dentro del área de estudio (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Por ello, los criterios de discretización deben entenderse como principios de representación espacial que permiten organizar la variabilidad física e hidrológica de la cuenca. La representación espacial distribuida es fundamental para simular la variabilidad de los parámetros, las entradas y las respuestas hidrológicas en modelos de cuenca (Abbott et al., 1986). En este contexto, la aplicación conceptual de los criterios de discretización se relaciona con la capacidad del modelo para diferenciar zonas con comportamientos hidrológicos contrastantes, especialmente cuando existen variaciones relevantes en pendiente, cobertura del

suelo, tipo de suelo, red de drenaje y distribución espacial de la precipitación (Barbosa et al., 2019).

2.3.4. Estudios previos sobre discretización espacial y modelamiento hidrológico con HEC-HMS

Diversos estudios han demostrado que la discretización espacial constituye un aspecto relevante dentro del modelamiento hidrológico, debido a que la forma en que se divide una cuenca puede modificar la representación de sus características físicas, la estimación de caudales, la forma de los hidrogramas y la respuesta hidrológica simulada. En ese sentido, la discretización no debe entenderse únicamente como una subdivisión geométrica del área de estudio, sino como una decisión técnica que puede influir en la interpretación del comportamiento hidrológico de la cuenca (Barbosa et al., 2019).

Desde el enfoque de la discretización espacial y su influencia en el desempeño del modelo, se ha evaluado el efecto de diferentes niveles de subdivisión de una cuenca en el modelamiento con HEC-HMS, señalándose que una mayor subdivisión no necesariamente mejora la simulación cuando no existen diferencias fisiográficas marcadas que justifiquen dicho nivel de detalle (Barbosa et al., 2019). De manera complementaria, se ha analizado la influencia de la discretización espacial en la modelación de inundaciones mediante la teoría del hidrograma unitario, destacándose que el nivel de representación espacial puede afectar la forma del hidrograma, el tiempo de respuesta y la distribución temporal del caudal (Steinmetz et al., 2019). Asimismo, se ha abordado la optimización de Unidades de Respuesta Hidrológica considerando datos meteorológicos grillados y parámetros espacialmente variables (Poblete et al., 2020), mientras que también se ha evaluado la optimización de la discretización espacial en función de la calidad, resolución y variabilidad de los datos de entrada disponibles (Puche et al., 2025). Estos estudios permiten sostener que la definición del nivel de discretización debe guardar

relación con la variabilidad física de la cuenca y con la información disponible para el modelamiento.

En cuanto a las aplicaciones de HEC-HMS, diversos estudios han evidenciado la utilidad del software para representar procesos de precipitación-escorrentía, estimar caudales y evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca frente a diferentes condiciones hidrometeorológicas. Se ha aplicado HEC-HMS en la cuenca del río Meki, en Etiopía, para modelar el proceso lluvia-escorrentía y predecir caudales de crecida (Guduru et al., 2023). De manera similar, se empleó HEC-HMS en la cuenca del río Tikur Wuha, utilizando métodos como SCS-CN, SCS-UH, Muskingum y flujo base constante mensual, obteniéndose resultados adecuados según indicadores estadísticos de comparación entre caudales observados y simulados (Guduru & Mohammed, 2024). A nivel nacional, se integró HEC-HMS con HEC-RAS para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura (Orellana Cabello, 2021), mientras que también se aplicó HEC-HMS en la parte alta de la cuenca Chancay-Lambayeque, evidenciándose la importancia de una adecuada selección de métodos hidrológicos, parámetros de flujo base y tránsito de caudales (Yupanqui Silva, 2023).

Por otro lado, la incertidumbre asociada a la información hidrométrica también ha sido identificada como un aspecto relevante en la aplicación de modelos hidrológicos. Se analizó la calibración automática de HEC-HMS bajo incertidumbre en la curva de gasto en la cuenca de Allala, Argelia, evidenciándose que la calidad de la información hidrométrica puede influir en la estimación de parámetros como el número de curva y la abstracción inicial (Kastali et al., 2022). Este antecedente resalta la importancia de interpretar los resultados de modelamiento considerando las limitaciones propias de los datos observados o de referencia.

En conjunto, los antecedentes revisados permiten reconocer tres aspectos centrales para el modelamiento hidrológico: la influencia de la discretización espacial en la representación de

la respuesta de la cuenca, la utilidad de HEC-HMS como herramienta para simular procesos lluvia-escorrentía y la necesidad de considerar la calidad e incertidumbre de la información hidrométrica empleada como referencia. De esta manera, el análisis de estudios previos proporciona una base conceptual para comprender cómo el nivel de representación espacial, la selección de métodos hidrológicos y la disponibilidad de datos influyen en la interpretación de los caudales simulados.

2.4. Métodos de Transformación Lluvia-Escorrentía

Los métodos de transformación lluvia-escorrentía permiten representar la forma en que la precipitación que cae sobre una cuenca se convierte en caudal en un punto de salida. En el modelamiento hidrológico, este proceso comprende la estimación de pérdidas hidrológicas, la obtención de la precipitación efectiva y su posterior transformación en escorrentía directa, debido a que no toda el agua precipitada contribuye inmediatamente al caudal superficial. Por ello, estos métodos permiten representar la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa, considerando la respuesta hidrológica de la cuenca frente a la distribución temporal y espacial de la lluvia (Natural Resources Conservation Service, 2007).

En el software HEC-HMS, la simulación lluvia-escorrentía se desarrolla mediante la combinación de métodos hidrológicos que permiten representar pérdidas, transformación de precipitación efectiva en escorrentía, flujo base y tránsito de caudales. Este enfoque permite construir modelos de cuenca mediante elementos como subcuencas, tramos de cauce, uniones, reservorios y puntos de salida, los cuales se configuran de acuerdo con las características físicas del área de estudio y con los datos hidrometeorológicos disponibles (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Dentro de los métodos más utilizados se encuentra el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos, conocido como SCS-CN, el cual permite estimar las

pérdidas hidrológicas y obtener la precipitación efectiva a partir de la precipitación total. Este método considera la influencia del uso y cobertura del suelo, el tipo hidrológico del suelo, la condición superficial y la humedad antecedente, por lo que resulta útil para representar la capacidad de una cuenca o subcuenca para generar escorrentía (Natural Resources Conservation Service, 2004).

Luego de estimar la precipitación efectiva, se requiere transformar dicho exceso de lluvia en un hidrograma de escorrentía directa. Para ello, el Hidrograma Unitario del SCS permite representar la respuesta temporal de una subcuenca mediante parámetros como el tiempo de retardo, el tiempo al pico y el caudal máximo. Este método permite analizar cómo la precipitación efectiva se distribuye en el tiempo hasta generar un hidrograma de salida, lo cual resulta importante para evaluar caudales simulados y volúmenes bajo hidrogramas durante el periodo de análisis (Natural Resources Conservation Service, 2007).

2.4.1. Método del Número de Curva (SCS-CN)

El método del Número de Curva, conocido como SCS-CN, es un procedimiento empírico desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS), actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS), para estimar la escorrentía directa generada a partir de la precipitación ocurrida sobre una cuenca. En el modelamiento hidrológico, este método permite separar la precipitación total en pérdidas hidrológicas y precipitación efectiva, considerando que no toda el agua precipitada contribuye directamente al caudal de salida de la cuenca. En HEC-HMS, este procedimiento se emplea como método de pérdidas, debido a que permite determinar la parte de la precipitación que se transforma en escorrentía directa dentro de cada subcuenca o unidad de análisis (Natural Resources Conservation Service, 2004).

El número de curva (CN) es un parámetro adimensional que permite representar la capacidad de una cuenca para generar escorrentía superficial. Su valor varía entre 0 y 100, donde

valores bajos indican mayor capacidad de infiltración y menor tendencia a producir escorrentía, mientras que valores altos representan superficies con menor capacidad de infiltración y mayor potencial de escurrimiento. Este parámetro integra la influencia del tipo hidrológico del suelo, el uso y manejo del terreno, la cobertura vegetal, la condición superficial y la humedad antecedente, por lo que resulta adecuado para estudios donde se dispone de información espacial de uso de suelo y características físicas del terreno (Natural Resources Conservation Service, 2004).

El método SCS-CN se basa en el principio de que la precipitación efectiva o escorrentía directa (Pe) es menor o igual que la precipitación total (P). Asimismo, considera que la retención acumulada (Fa) no puede superar la retención potencial máxima del suelo (S), y que antes de que se genere escorrentía directa deben satisfacerse ciertas pérdidas iniciales (Ia), asociadas principalmente a la intercepción, almacenamiento superficial, retención en depresiones e infiltración inicial. Bajo este enfoque, la hipótesis fundamental del método establece una relación proporcional entre la escorrentía real, la escorrentía potencial y la retención del sistema (Natural Resources Conservation Service, 2004).

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

P_e es la precipitación efectiva en milímetros.

P es la precipitación total en milímetros.

I_a representa la abstracción inicial, en milímetros.

F_a es la retención acumulada en milímetros.

S es la retención potencial máxima en milímetros.

A partir del balance entre precipitación, abstracción inicial, retención acumulada y

escorrentía directa, se establece que la precipitación total se distribuye entre las pérdidas iniciales, la retención acumulada y la precipitación efectiva. Esta relación permite expresar el equilibrio hidrológico del método de la siguiente manera:

$$P = I_a + F_a + P_e \quad \text{(Ec. 2)}$$

Al reemplazar esta relación en la hipótesis principal del método, se obtiene la ecuación general para estimar la precipitación efectiva:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{(Ec. 3)}$$

Esta ecuación se aplica cuando la precipitación total es mayor que la abstracción inicial, es decir, cuando $P > I_a$. En caso contrario, si la precipitación no supera las pérdidas iniciales, no se genera escorrentía directa, por lo que la precipitación efectiva se expresa de la siguiente manera:

$$\mathrm{P_e} = 0\,, \qquad \text{si P} \leq I_a \quad \text{(Ec. 4)}$$

El parámetro de retención potencial máxima (S) se encuentra directamente relacionado con el número de curva (CN). Cuando se trabaja en unidades del Sistema Internacional, la relación puede expresarse como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254\ (mm) \quad \text{(Ec. 5)}$$

Donde:

S es la retención potencial máxima, en milímetros.

CN es el número de curva.

De manera tradicional, el método SCS-CN considera que la abstracción inicial (Ia) puede estimarse como una fracción de la retención potencial máxima. Para ello, se emplea la siguiente relación:

$$I_a = 0.2S \quad \text{(Ec. 6)}$$

Al reemplazar esta expresión en la ecuación general de la precipitación efectiva, se obtiene la forma clásica del método SCS-CN:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{(Ec. 7)}$$

Esta expresión se aplica cuando $P > 0.2S$; cuando $P \leq 0.2S$, la precipitación efectiva es igual a cero.

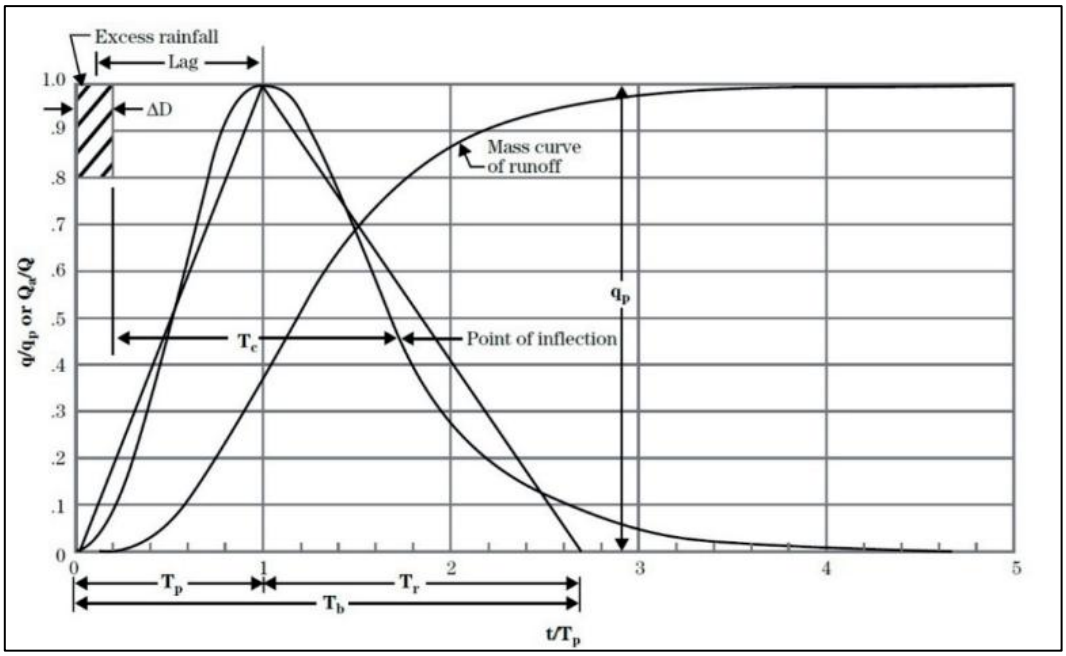
Esta ecuación permite estimar la precipitación efectiva a partir de la precipitación total y del valor de retención potencial máxima, el cual depende directamente del número de curva. En ese sentido, el método permite vincular las características físicas del terreno con la generación de escorrentía, debido a que el valor de CN incorpora información relacionada con el uso y cobertura del suelo, el tipo hidrológico del suelo y la condición antecedente de humedad (Natural Resources Conservation Service, 2004).

2.4.2. Hidrograma Unitario del SCS

El Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos, ver Figura 3, conocido como Hidrograma Unitario del SCS, es un método de transformación lluvia-escorrentía que permite representar la respuesta temporal de una cuenca ante una unidad de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre el área de drenaje durante una duración determinada. Este método se basa en un hidrograma unitario adimensional, mediante el cual se relaciona el caudal con respecto al caudal pico y el tiempo con respecto al tiempo al pico, permitiendo describir la forma general de la escorrentía directa generada por una cuenca o subcuenca (Natural Resources Conservation Service, 2007).

Figura 3

Representación conceptual de los parámetros temporales del Hidrograma Unitario del SCS



Nota. Adaptado de Natural Resources Conservation Service (2007).

El enfoque del Hidrograma Unitario del SCS considera un hidrograma curvilíneo adimensional, en el cual aproximadamente el 37.5 % de la escorrentía directa ocurre antes de alcanzar el caudal máximo, mientras que el volumen restante se distribuye después del pico, conformando la rama de recesión del hidrograma. Esta característica permite representar la distribución temporal de la escorrentía directa, considerando que la forma del hidrograma depende de las condiciones físicas del área de drenaje, tales como la pendiente, la longitud hidráulica, el área de aporte y el tiempo de respuesta de la cuenca (Natural Resources Conservation Service, 2007).

En la aplicación del método, uno de los parámetros principales es el tiempo de retardo, el cual se define como el intervalo entre el centroide de la precipitación efectiva y el caudal máximo del hidrograma resultante. De manera práctica, el tiempo de retardo se relaciona con el

tiempo de concentración de la cuenca, debido a que ambos parámetros representan la rapidez con la que el agua se desplaza desde las zonas de aporte hacia el punto de salida. Para el método SCS, el tiempo de retardo suele estimarse como el 60 % del tiempo de concentración, tal como se expresa en la siguiente ecuación (Natural Resources Conservation Service, 2007).

$$t_{lag} = 0.6T_c \quad \text{(Ec. 8)}$$

Donde:

t_{lag} es el tiempo de retardo de la cuenca.

T_c es el tiempo de concentración.

El tiempo al pico del hidrograma se calcula considerando la duración de la precipitación efectiva y el tiempo de retardo de la cuenca. Este parámetro representa el tiempo transcurrido desde el inicio del exceso de precipitación hasta el momento en que se alcanza el caudal máximo. Su expresión general es la siguiente (Natural Resources Conservation Service, 2007):

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_{lag} \quad \text{(Ec. 9)}$$

Donde:

T_p es el tiempo al pico.

t_r es el tiempo de la duración de la precipitación efectiva o intervalo de cálculo.

t_{lag} es el tiempo de retardo de la cuenca.

El caudal pico del hidrograma unitario se encuentra relacionado con el área de la cuenca, la precipitación efectiva y el tiempo al pico. En unidades del Sistema Internacional, esta relación puede expresarse de la siguiente manera (Natural Resources Conservation Service, 2007):

$$Q_p = \frac{0.208AP_e}{T_p} \quad \text{(Ec. 10)}$$

Donde:

Q_p es el caudal pico en m^3/s.

A es el área de la cuenca o subcuenca en km^2.

P_e es la precipitación efectiva en milímetros.

T_p es el tiempo al pico en horas.

0.208 es el factor de conversión para unidades del Sistema Internacional.

En el sistema tradicional de unidades inglesas, el método utiliza un factor de tasa máxima conocido como Peak Rate Factor (PRF). El valor estándar del Hidrograma Unitario del SCS corresponde a un PRF de 484, el cual representa una condición media de respuesta hidrológica. Sin embargo, este valor puede variar de acuerdo con las características físicas de la cuenca, ya que cuencas más planas pueden presentar factores menores y cuencas con pendientes más pronunciadas pueden presentar factores mayores. Por ello, la selección del factor de forma debe ser coherente con la pendiente, longitud de flujo, tiempo de concentración y respuesta hidrológica esperada de la cuenca (Natural Resources Conservation Service, 2007).

Dentro de HEC-HMS, el Hidrograma Unitario del SCS forma parte de los métodos disponibles para la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa. Su incorporación en el software permite representar la distribución temporal del hidrograma a partir de parámetros hidrológicos como el tiempo de retardo, el tiempo al pico y el caudal pico, los cuales intervienen en la caracterización de la respuesta lluvia-escorrentía de una cuenca o subcuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.5. Tránsito de Avenidas y Flujo Base

El tránsito de avenidas y el flujo base constituyen componentes importantes dentro del modelamiento hidrológico, debido a que permiten representar la evolución temporal del caudal generado en una cuenca. El tránsito de avenidas describe la transformación de un hidrograma

conforme el caudal se desplaza a través de un cauce, tramo de río, canal o sistema de almacenamiento, pudiendo modificar la magnitud del caudal pico, el tiempo de ocurrencia del máximo caudal y la forma del hidrograma aguas abajo (Arrieta-Pastrana et al., 2024).

Por su parte, el flujo base representa la contribución sostenida al caudal proveniente principalmente del almacenamiento subterráneo, la descarga gradual de acuíferos y otros aportes retardados del sistema hidrológico. Este componente permite explicar la permanencia del caudal en los cauces durante periodos sin precipitación directa y contribuye a representar la rama de recesión del hidrograma (Mao et al., 2024).

En los modelos hidrológicos, ambos procesos complementan la representación de la respuesta lluvia-escorrentía, debido a que el hidrograma total no depende únicamente de la escorrentía superficial inmediata, sino también de la propagación del caudal a través de la red de drenaje y de los aportes retardados que sostienen el flujo en el tiempo. En HEC-HMS, estos procesos pueden representarse mediante métodos específicos de tránsito de caudales y flujo base, cuya selección depende del tipo de análisis, la información disponible y las características hidrológicas de la cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.5.1. Método Muskingum: fundamentos y aplicación en HEC-HMS

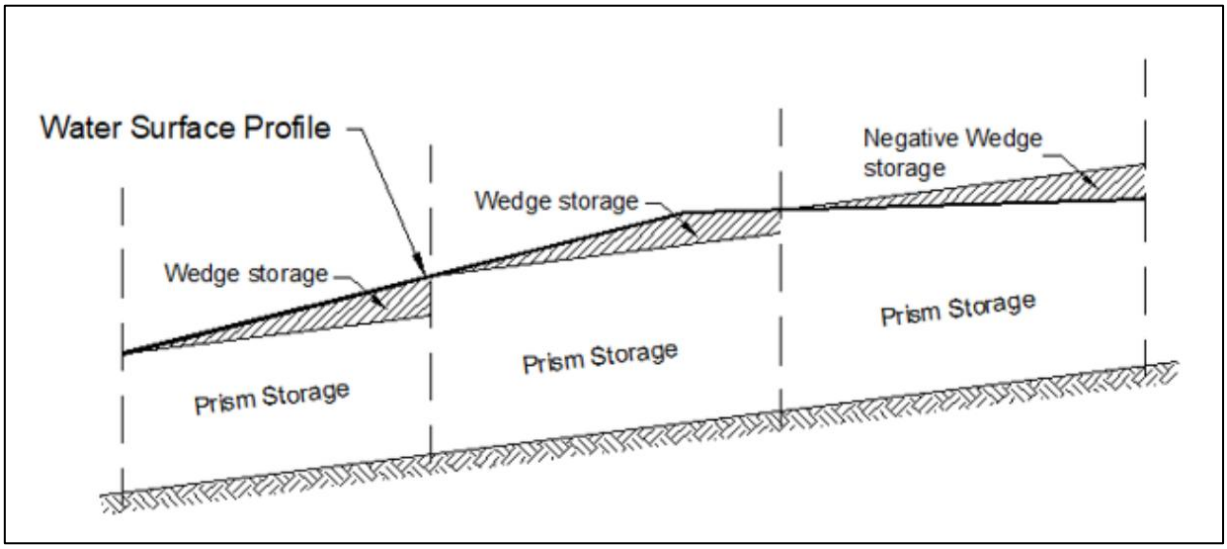
El método Muskingum es un procedimiento hidrológico utilizado para el tránsito de avenidas en cauces, ver Figura 4, el cual permite transformar un hidrograma de entrada en un hidrograma de salida considerando el almacenamiento temporal del agua dentro de un tramo de río o canal. Este método se basa en el principio de conservación de masa y permite representar la atenuación y el desfase temporal de una onda de avenida conforme se desplaza aguas abajo (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El fundamento del método considera que el almacenamiento total en un tramo puede representarse como la combinación de un almacenamiento prismático y un almacenamiento en

cuña. El almacenamiento prismático se asocia con el caudal de salida, mientras que el almacenamiento en cuña representa la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida durante el paso de la onda de avenida. En ese sentido, durante la rama ascendente del hidrograma el almacenamiento tiende a incrementarse, mientras que durante la rama descendente disminuye progresivamente (Arrieta-Pastrana et al., 2024).

Figura 4

Representación conceptual del almacenamiento prismático y en cuña en el método Muskingum



Nota. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (2026), basado en Linsley et al. (1982).

La expresión general del almacenamiento en el método Muskingum se representa de la siguiente manera (Chow et al., 1994):

$$S = K[XI + (1 - X)O] \qquad \text{(Ec. 11)}$$

Donde:

S es el almacenamiento en el tramo de cauce.

K es el tiempo de tránsito o tiempo de viaje de la onda de avenida.

X es el coeficiente de ponderación adimensional.

I es el caudal de entrada al tramo.

O es el caudal de salida del tramo.

El parámetro K representa el tiempo aproximado que tarda la onda de avenida en desplazarse a través del tramo de cauce, mientras que el parámetro X permite ponderar la influencia relativa del caudal de entrada y del caudal de salida sobre el almacenamiento. En HEC-HMS, el valor de X debe encontrarse entre 0 y 0.5; cuando X=0, el comportamiento se aproxima a un almacenamiento tipo embalse lineal, mientras que cuando X=0.5, la onda presenta menor atenuación durante su desplazamiento (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

A partir de la ecuación de continuidad y de la relación de almacenamiento del método Muskingum, el caudal de salida puede calcularse de forma recursiva mediante la siguiente expresión (Chow et al., 1994):

$$O_t = C_0 I_t + C_1 I_{t-1} + C_2 O_{t-1} \qquad \text{(Ec. 12)}$$

Donde:

O_t es el caudal de salida en el tiempo actual.

I_t es el caudal de entrada en el tiempo actual.

I_{t-1} es el caudal de entrada en el tiempo anterior.

O_{t-1} es el caudal de salida en el tiempo anterior.

$C_0, C_1\ y\ C_2$ son coeficientes de tránsito del método Muskingum.

Los coeficientes se expresan de la siguiente manera:

$$C_0 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$
$$C_1 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \qquad \text{(Ec. 13)}$$
$$C_2 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}$$

Donde:

Δt es el intervalo de tiempo de cálculo.

K es el tiempo de tránsito del tramo.

X es el coeficiente de ponderación.

En HEC-HMS, el método Muskingum se aplica en los tramos de cauce definidos dentro del modelo de cuenca, permitiendo trasladar los hidrogramas generados en las subcuencas hacia los puntos de unión y salida. Para su aplicación, el modelo requiere definir la condición inicial, el valor de K, el valor de X y el número de subtramos o subreaches. Estos parámetros influyen en la atenuación del hidrograma y en el tiempo de desplazamiento de la avenida, por lo que deben ser definidos de acuerdo con las características hidráulicas del cauce y, cuando sea posible, mediante contraste con información observada o hidrométrica de referencia (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Estudios recientes sobre tránsito de caudales en canales señalan que los métodos de enrutamiento hidrológico permiten determinar la magnitud y el tiempo de ocurrencia del caudal en puntos aguas abajo a partir de un hidrograma de entrada. En ese sentido, métodos como Muskingum siguen siendo relevantes para representar la transformación de hidrogramas en modelos lluvia-escorrentía, especialmente cuando el objetivo es analizar la propagación general del caudal dentro de una red de drenaje (Arrieta-Pastrana et al., 2024).

2.5.2. Caudal base: definición, fuentes y métodos de estimación

El caudal base corresponde a la fracción del caudal de un río que se mantiene durante periodos sin precipitación directa, proveniente principalmente de aportes subterráneos, almacenamiento en el suelo, drenaje lento de acuíferos y flujos retardados desde zonas saturadas. Este componente permite explicar la permanencia del flujo en los cauces después de que la escorrentía superficial generada por un evento de lluvia ha disminuido, por lo que

constituye una parte importante de la respuesta hidrológica de una cuenca, especialmente en simulaciones continuas o de escala diaria (Mao et al., 2024).

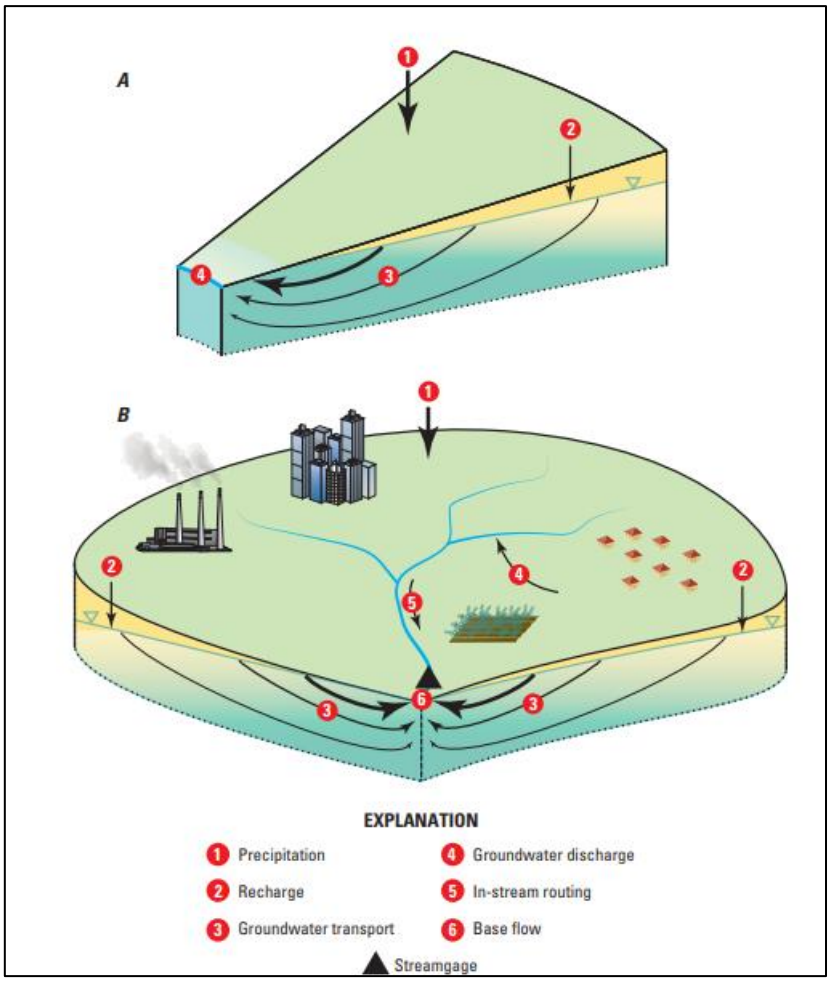
Desde el punto de vista hidrológico, el caudal base puede originarse por la descarga gradual de acuíferos hacia el cauce, el flujo subsuperficial retardado, el almacenamiento temporal en zonas húmedas y la liberación progresiva de agua desde el suelo hacia la red de drenaje. Su magnitud depende de factores como la geología, la capacidad de almacenamiento del suelo, la recarga subterránea, la pendiente, la cobertura vegetal y la variabilidad climática de la cuenca. Por ello, el caudal base influye principalmente en la rama de recesión del hidrograma y en la continuidad del caudal durante periodos de menor aporte superficial (Mao et al., 2024).

La estimación del caudal base puede realizarse mediante métodos de separación aplicados sobre series de caudal observado, los cuales permiten distinguir la contribución subterránea o retardada respecto del caudal total. Entre estos métodos se encuentran procedimientos como UKIH, HYSEP y filtros digitales, empleados para analizar la variabilidad temporal del flujo base y su contribución al régimen hidrológico de una cuenca (Mao et al., 2024).

El caudal base se encuentra estrechamente relacionado con los procesos de recarga y almacenamiento subterráneo de la cuenca. Parte de la precipitación se infiltra y contribuye a la recarga del sistema subterráneo, desde donde el agua puede desplazarse y descargar posteriormente hacia la red de drenaje. Este aporte, una vez incorporado al cauce y propagado hasta el punto de control, constituye una de las principales contribuciones al caudal base, tal como se representa conceptualmente en la Figura 5.

Figura 5

Representación conceptual del origen y aporte del caudal base a la red de drenaje



Nota. Adaptado de Raffensperger et al. (2017).

En el modelamiento hidrológico, el flujo base se representa mediante métodos conceptuales que buscan aproximar la descarga retardada del almacenamiento subterráneo o subsuperficial hacia los cauces. En HEC-HMS, la documentación técnica considera alternativas como el caudal mensual constante, el método de recesión, el método de recesión acotada, el reservorio lineal y el método no lineal de Boussinesq. Estos métodos presentan diferentes niveles de complejidad y se seleccionan de acuerdo con el tipo de simulación, la disponibilidad de información y la forma en que se requiere representar la contribución sostenida al hidrograma

total (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Uno de los enfoques conceptuales más utilizados para representar el flujo base es el método de recesión, el cual asume que el caudal base disminuye progresivamente en el tiempo a partir de un caudal inicial. Esta disminución suele representarse mediante una constante de recesión que expresa la velocidad con la que se reduce el aporte retardado del sistema hidrológico. En términos generales, valores cercanos a 1 indican una recesión lenta, asociada a aportes subterráneos sostenidos, mientras que valores menores representan una disminución más rápida del caudal base (U.S. Army Corps of Engineers, 2026). Su expresión general puede representarse como:

$$Q_t = Q_0 k^t \qquad \text{(Ec. 14)}$$

Donde:

Q_t es el caudal base en el tiempo t.

Q_0 es el caudal base inicial.

k es la constante de recesión.

t es el tiempo transcurrido.

En este método, la constante de recesión k debe ser menor que 1.0 para representar la disminución natural del flujo base en el tiempo. Valores cercanos a 1.0 indican una recesión lenta, asociada a aportes subterráneos sostenidos; mientras que valores menores representan una disminución más rápida del caudal base. En HEC-HMS, este parámetro puede estimarse a partir de hidrogramas observados, especialmente analizando la rama de recesión del caudal después de un evento de precipitación (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El método de caudal mensual constante permite especificar un valor de flujo base para cada mes del año, por lo que resulta útil cuando el comportamiento del flujo base puede aproximarse mediante valores mensuales representativos. No obstante, debe interpretarse como

una aproximación simplificada, debido a que este método no conserva masa dentro de la subcuenca. Por otro lado, el método de reservorio lineal representa el flujo base mediante uno o más reservorios conceptuales, en los cuales el agua infiltrada o percolada se almacena temporalmente y luego descarga hacia el cauce, permitiendo representar el almacenamiento y la liberación retardada del agua dentro del sistema hidrológico (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.5.3. Importancia en la simulación de hidrogramas

La correcta representación del tránsito de avenidas y del flujo base es importante para la simulación de hidrogramas, debido a que ambos procesos influyen en la forma, magnitud, duración y volumen bajo el hidrograma generado por una cuenca. El tránsito de avenidas permite representar el desplazamiento y la atenuación del caudal a través de los cauces, mientras que el flujo base permite incorporar la contribución retardada que mantiene el caudal después de la respuesta inmediata de la escorrentía superficial (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

En un hidrograma simulado, el tránsito de avenidas puede modificar el caudal pico, retrasar el tiempo de ocurrencia del máximo caudal y ensanchar la curva de salida conforme el flujo avanza aguas abajo. Estos efectos son importantes en cuencas donde existen tramos de cauce con almacenamiento significativo, pendientes variables o tiempos de viaje relevantes. Por ello, una representación inadecuada del tránsito puede generar errores en la estimación del caudal máximo, en el tiempo al pico y en el volumen bajo el hidrograma (Arrieta-Pastrana et al., 2024).

El flujo base, por su parte, influye principalmente en la rama de recesión del hidrograma y en los caudales simulados durante periodos sin precipitación directa. Si este componente no se representa adecuadamente, el modelo puede subestimar los caudales de recesión o atribuir de manera excesiva la respuesta total a la escorrentía directa. En ese sentido, el flujo base permite

que el hidrograma simulado tenga una transición más coherente entre los eventos de lluvia y los periodos de menor aporte superficial (Mao et al., 2024).

En HEC-HMS, la integración de métodos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía, tránsito de caudales y flujo base permite construir un hidrograma total a partir de diferentes componentes hidrológicos. Por ello, la calidad de los resultados depende de la coherencia entre los datos de entrada, la discretización espacial, la selección de métodos y la definición adecuada de los parámetros. En términos generales, una representación adecuada de estos procesos contribuye a mejorar la coherencia hidrológica de las simulaciones y a obtener hidrogramas más consistentes con el comportamiento esperado de la cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.6. Evaluación estadística y comparativa de resultados hidrológicos simulados

La evaluación estadística de resultados hidrológicos simulados constituye una etapa fundamental dentro del modelamiento hidrológico, debido a que permite analizar la consistencia, sensibilidad y variabilidad de la respuesta hidrológica obtenida bajo diferentes condiciones de representación espacial. En modelos semidistribuidos, el nivel de discretización espacial puede influir en la forma en que se representan las características físicas de la cuenca, los parámetros hidrológicos y la distribución espacial de las variables climáticas. Por ello, la evaluación de los resultados no debe limitarse únicamente a la comparación puntual de caudales, sino que debe incorporar indicadores que permitan analizar la magnitud, distribución, similitud temporal y diferencias entre las series simuladas. La importancia de evaluar integralmente los resultados de modelos hidrológicos y emplear múltiples indicadores estadísticos ha sido ampliamente reconocida en la literatura especializada (Moriasi et al., 2007).

Diversos estudios señalan que la evaluación del desempeño de modelos hidrológicos requiere el uso conjunto de diferentes métricas estadísticas, debido a que cada una proporciona

información específica sobre el comportamiento de las series comparadas. Mientras algunas métricas cuantifican la magnitud de las diferencias entre series, otras permiten evaluar la similitud temporal, la asociación lineal o la existencia de sesgos sistemáticos. En consecuencia, la utilización de múltiples indicadores contribuye a obtener una evaluación más integral de la respuesta hidrológica simulada y permite superar las limitaciones inherentes a cada indicador (Gupta et al., 2009).

En investigaciones orientadas al análisis de la discretización espacial, la evaluación estadística suele enfocarse en la comparación entre escenarios con diferentes niveles de detalle espacial, con el propósito de identificar si el incremento del número de unidades espaciales genera cambios significativos en los resultados simulados o si estos tienden a estabilizarse a partir de determinados niveles de discretización. Se ha demostrado que la subdivisión espacial puede modificar la simulación del escurrimiento y la producción de sedimentos, así como influir en las predicciones de caudal, sedimentos y nutrientes en SWAT (Jha et al., 2004). Bajo este enfoque, es común seleccionar un escenario de mayor resolución espacial como referencia interna para evaluar la similitud y distancia de los demás escenarios.

Asimismo, cuando se dispone de información hidrométrica observada, esta puede emplearse como referencia complementaria para contrastar la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales simulados. Sin embargo, la interpretación de los indicadores de desempeño debe considerar las características de la serie observada utilizada como referencia, especialmente cuando esta puede estar influenciada por procesos de regulación hidráulica o intervenciones antrópicas que modifiquen el régimen natural de caudales. Por ello, la selección e interpretación de los criterios de evaluación deben realizarse considerando las particularidades de la información disponible y los objetivos del estudio (Krause et al., 2005).

En términos generales, la evaluación estadística de resultados hidrológicos puede

agruparse en tres categorías principales: estadísticos descriptivos de caudal, métricas de distancia y sesgo entre series hidrológicas, y métricas de similitud, correlación y desempeño. La integración de estos indicadores permite analizar la estabilidad y coherencia de la respuesta hidrológica simulada frente a diferentes configuraciones espaciales del modelo. La combinación de métricas proporciona una visión más completa del comportamiento del modelo y evita interpretaciones basadas en un único indicador (Moriasi et al., 2007).

2.6.1. Métricas de distancia y sesgo entre series hidrológicas

Las métricas de distancia y sesgo constituyen herramientas ampliamente utilizadas en la evaluación de series hidrológicas, debido a que permiten cuantificar las diferencias existentes entre dos conjuntos de datos en términos de magnitud promedio, diferencias relativas, errores asociados a valores extremos y tendencias sistemáticas de sobreestimación o subestimación. Se ha destacado la importancia de emplear medidas que reflejen adecuadamente la calidad del ajuste entre series, así como la utilidad de indicadores basados en errores absolutos para evaluar el desempeño promedio de los modelos (Legates & McCabe, 1999).

El error absoluto medio, conocido como MAE por sus siglas en inglés (*Mean Absolute Error*), permite estimar la diferencia promedio absoluta entre dos series de caudales. Esta métrica no considera el signo de la diferencia, por lo que expresa únicamente la magnitud media de separación entre ambas series. Valores menores de MAE indican una mayor proximidad entre las series comparadas. Las métricas basadas en errores absolutos presentan ventajas al representar de manera directa la magnitud promedio de las discrepancias entre series (Willmott & Matsuura, 2005).

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Q_{a,i} - Q_{b,i}\right| \qquad \text{(Ec. 15)}$$

Donde:

MAE es el error absoluto medio entre dos series de caudales.

$Q_{a,i}$ es el caudal de la primera serie en el tiempo i.

$Q_{b,i}$ es el caudal de la segunda serie en el tiempo i.

n es el número total de datos.

El error absoluto medio relativo, denominado en esta investigación como MRAE por sus siglas en inglés, permite expresar el MAE en términos porcentuales respecto al caudal medio de una de las series consideradas como referencia. Esta métrica facilita la comparación de diferencias entre series con distintos órdenes de magnitud, debido a que normaliza el error absoluto medio respecto al valor medio de la serie de referencia (Legates & McCabe, 1999).

$$\text{MRAE} = \frac{\text{MAE}}{\overline{Q_b}} \times 100 \qquad \text{(Ec. 16)}$$

Donde:

MRAE es el error absoluto medio relativo, expresado en porcentaje.

MAE es el error absoluto medio entre las series comparadas.

$\overline{Q_b}$ es el caudal medio de la serie de referencia.

El error cuadrático medio, conocido como RMSE por sus siglas en inglés (*Root Mean Square Error*), permite evaluar la magnitud de las diferencias entre dos series de caudales otorgando mayor peso a los errores de gran magnitud. Debido a que las diferencias son elevadas al cuadrado antes de ser promediadas, esta métrica resulta especialmente sensible a discrepancias asociadas a caudales altos o eventos extremos. Esta característica convierte al RMSE en un indicador útil cuando se busca identificar errores importantes asociados a valores extremos (Chai & Draxler, 2014).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{a,i} - Q_{b,i}\right)^2} \qquad \text{(Ec. 17)}$$

Donde:

RMSE es el error cuadrático medio entre dos series de caudales.

$Q_{a,i}$ es el caudal de la primera serie en el tiempo i.

$Q_{b,i}$ es el caudal de la segunda serie en el tiempo i.

n es el número total de datos.

El sesgo medio permite identificar la existencia de una tendencia sistemática de una serie a presentar valores superiores o inferiores respecto a otra. A diferencia del MAE y del RMSE, este indicador conserva el signo de la diferencia, por lo que permite determinar la dirección del sesgo. Un sesgo medio positivo indica una tendencia a presentar valores mayores que la serie de referencia, mientras que un sesgo medio negativo indica una tendencia a presentar valores menores. La identificación del sesgo es esencial para comprender las limitaciones y fortalezas de los modelos hidrológicos (Gupta et al., 2009).

$$\text{Sesgo medio} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{a,i} - Q_{b,i}\right) \qquad \text{(Ec. 18)}$$

Donde:

Sesgo medio es la diferencia promedio entre las series comparadas.

$Q_{a,i}$ es el caudal de la primera serie en el tiempo i.

$Q_{b,i}$ es el caudal de la segunda serie en el tiempo i.

n es el número total de datos.

En conjunto, el MAE, el MRAE, el RMSE y el Sesgo medio permiten evaluar la magnitud, dirección y distribución de las diferencias entre series hidrológicas. Estas métricas

proporcionan información complementaria sobre la estabilidad y variabilidad de la respuesta hidrológica simulada, por lo que son ampliamente utilizadas en estudios de comparación de escenarios y análisis de sensibilidad (Gupta et al., 2009).

2.6.2. Métricas de similitud, correlación y desempeño complementario

Las métricas de similitud y correlación permiten evaluar el grado de asociación entre dos series de caudales, considerando la forma en que sus valores varían a lo largo del tiempo. Estas métricas complementan a los indicadores de distancia y sesgo, debido a que permiten analizar si dos hidrogramas presentan patrones temporales similares, aun cuando existan diferencias en magnitud. La combinación de distintos criterios de evaluación mejora la interpretación del desempeño de los modelos hidrológicos (Krause et al., 2005).

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida estadística que permite evaluar el grado de asociación lineal entre dos series de datos. Sus valores varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una relación lineal positiva fuerte, valores cercanos a 0 indican ausencia de relación lineal y valores cercanos a -1 representan una relación lineal negativa. Este coeficiente fue desarrollado como una medida de asociación estadística y posteriormente su aplicación se extendió ampliamente al análisis hidrológico para evaluar la similitud temporal entre series de caudales (Pearson, 1895).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{a,i} - \overline{Q_a}\right)\left(Q_{b,i} - \overline{Q_b}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{a,i} - \overline{Q_a}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{b,i} - \overline{Q_b}\right)^2}} \qquad \text{(Ec. 19)}$$

Donde:

r es el coeficiente de correlación de Pearson.

$Q_{a,i}$ es el caudal de la primera serie en el tiempo i.

$Q_{b,i}$ es el caudal de la segunda serie en el tiempo i.

$\overline{Q_a}$ es el caudal medio de la primera serie.

$\overline{Q_b}$ es el caudal medio de la segunda serie.

n es el número total de datos.

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no paramétrica que evalúa la asociación monotónica entre dos series a partir del orden o rango de sus valores. A diferencia del coeficiente de Pearson, Spearman no requiere que la relación entre las variables sea estrictamente lineal, por lo que resulta útil para analizar la similitud temporal entre hidrogramas que presentan comportamientos no lineales. Este coeficiente fue propuesto como una alternativa robusta para evaluar asociaciones basadas en rangos (Spearman, 1904).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{a,i} - \overline{R_a}\right)\left(R_{b,i} - \overline{R_b}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{a,i} - \overline{R_a}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(R_{b,i} - \overline{R_b}\right)^2}} \qquad \text{(Ec. 20)}$$

Donde:

ρ es el coeficiente de correlación de Spearman.

$R_{a,i}$ es el rango del caudal de la primera serie en el tiempo i.

$R_{b,i}$ es el rango del caudal de la segunda serie en el tiempo i.

$\overline{R_a}$ es el promedio de los rangos de la primera serie.

$\overline{R_b}$ es el promedio de los rangos de la segunda serie.

n es el número total de datos.

Además de las métricas de correlación, en la evaluación hidrológica se emplean indicadores de desempeño que permiten analizar la capacidad de una serie simulada para reproducir el comportamiento de una serie observada o de referencia. Entre los indicadores más utilizados se encuentran la eficiencia de Nash-SuTcliffe, el coeficiente de determinación y el sesgo porcentual (Moriasi et al., 2007).

La eficiencia de Nash-SuTcliffe (NSE) es uno de los indicadores más empleados en la evaluación de modelos hidrológicos. Este coeficiente compara la capacidad predictiva del

modelo respecto al promedio de la serie observada. Fue introducido para evaluar modelos conceptuales de pronóstico de caudales y desde entonces se ha convertido en una referencia para la evaluación del desempeño hidrológico (Nash & Sutcliffe, 1970). Valores cercanos a 1 indican una alta eficiencia, valores próximos a 0 sugieren que el modelo no mejora significativamente la estimación basada en el promedio observado y valores negativos indican un desempeño deficiente (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}\right)^2} \qquad \text{(Ec. 21)}$$

Donde:

NSE es la eficiencia de Nash-SuTcliffe.

$Q_{obs,i}$ es el caudal observado en el tiempo i.

$Q_{sim,i}$ es el caudal simulado en el tiempo i.

$\bar{Q}_{obs}$ es el promedio del caudal observado.

n es el número total de datos.

El sesgo porcentual, conocido como PBIAS, permite identificar si el modelo presenta una tendencia sistemática a sobreestimar o subestimar los caudales observados. Valores cercanos a cero indican menor sesgo, mientras que valores alejados de cero reflejan diferencias sistemáticas entre los caudales simulados y observados. En estudios hidrológicos, esta métrica resulta útil porque permite analizar el comportamiento acumulado del modelo respecto al volumen total simulado (Barbosa et al., 2019).

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} Q_{obs,i}} \times 100 \qquad \text{(Ec. 22)}$$

Donde:

$PBIAS$ es el sesgo porcentual.

$Q_{obs,i}$ es el caudal observado en el tiempo i.

$Q_{sim,i}$ es el caudal simulado en el tiempo i.

n es el número total de datos.

De acuerdo con la convención adoptada en esta ecuación, valores positivos de PBIAS indican tendencia a la subestimación de los caudales observados, mientras que valores negativos indican tendencia a la sobreestimación.

En conjunto, las métricas de similitud, correlación y desempeño proporcionan información complementaria sobre la relación existente entre series hidrológicas, ver Tabla 2, permitiendo evaluar tanto la coherencia temporal como la capacidad de representación de los procesos hidrológicos simulados. Se recomienda el uso combinado de estos indicadores para obtener una evaluación más robusta, considerando las fortalezas y limitaciones de cada métrica (Gupta et al., 2009).

Tabla 2

Síntesis de las métricas estadísticas consideradas en la evaluación de las series hidrológicas

Métrica	Tipo de evaluación	Unidad	Criterio general de interpretación	Uso en la investigación
MAE	Distancia absoluta	m^3/s	Valores menores indican menor diferencia promedio entre las series	Comparación entre escenarios de discretización espacial respecto a 153 URHs
MRAE	Distancia relativa	%	Valores menores indican menor diferencia relativa	Evaluación de la reducción relativa de las diferencias entre escenarios

Métrica	Tipo de evaluación	Unidad	Criterio general de interpretación	Uso en la investigación
			respecto a la serie de referencia	
RMSE	Distancia cuadrática	m^3/s	Valores menores indican menor error; es sensible a diferencias de gran magnitud	Identificación de discrepancias importantes entre los caudales simulados
Sesgo medio	Sesgo	m^3/s	Valores próximos a cero indican menor tendencia sistemática; el signo indica la dirección de la diferencia	Evaluación de la tendencia de un escenario a presentar caudales mayores o menores respecto a la referencia
Pearson	Similitud lineal	Adimensional	Valores cercanos a 1 indican alta asociación lineal positiva	Evaluación de la similitud temporal lineal entre hidrogramas simulados
Spearman	Similitud monotónica	Adimensional	Valores cercanos a 1 indican alta asociación monotónica entre los rangos de ambas series	Evaluación de la similitud en el orden y comportamiento temporal de los caudales
NSE	Desempeño complementario	Adimensional	Valores cercanos a 1 indican mayor eficiencia; valores	Contraste hidrométrico

Métrica	Tipo de evaluación	Unidad	Criterio general de interpretación	Uso en la investigación
			negativos reflejan desempeño deficiente frente al promedio observado	complementario con la estación Sayán
PBIAS	Sesgo porcentual	%	Valores cercanos a cero indican menor sesgo porcentual; el signo expresa la dirección de la diferencia según la convención adoptada	Evaluación complementaria de sobreestimación o subestimación respecto a Sayán

Nota. Elaboración propia a partir de Legates y McCabe (1999), Willmott y Matsuura (2005), Chai y Draxler (2014), Gupta et al. (2009), Krause et al. (2005), Nash y SuTcliffe (1970), Moriasi et al. (2007) y Onyutha (2024).

2.7. Software HEC-HMS: aplicaciones y limitaciones

El software HEC-HMS, denominado Hydrologic Modeling System, es una herramienta de modelamiento hidrológico desarrollada por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, orientada a la simulación de procesos de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas. Su estructura permite representar la respuesta hidrológica de una cuenca mediante la integración de componentes físicos, información meteorológica, parámetros hidrológicos y especificaciones temporales de simulación, con el propósito de generar hidrogramas, caudales simulados y volúmenes de escorrentía bajo diferentes condiciones de análisis (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Una de las principales aplicaciones de HEC-HMS es la representación de eventos hidrológicos y procesos continuos, lo que permite analizar la respuesta de una cuenca frente a la ocurrencia de precipitaciones, estimar caudales de avenida, evaluar hidrogramas y apoyar estudios relacionados con la gestión del recurso hídrico, el análisis de disponibilidad hídrica y la evaluación de eventos extremos. En ese sentido, HEC-HMS constituye una herramienta ampliamente utilizada en estudios de ingeniería hidrológica, debido a que integra métodos conceptuales y empíricos para representar pérdidas hidrológicas, transformación lluvia-escorrentía, flujo base y tránsito de caudales (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El software incorpora diversos métodos hidrológicos que permiten adaptar el modelo a diferentes condiciones de cuenca y disponibilidad de información. Entre los métodos de pérdidas se incluyen alternativas como SCS Curve Number, Green-Ampt, Initial and Constant, Deficit and Constant, entre otros. Para la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa, HEC-HMS considera métodos como el Hidrograma Unitario del SCS, Clark, Snyder, ModClark, onda cinemática y onda difusiva bidimensional. Asimismo, el programa dispone de métodos para representar el flujo base y el tránsito de caudales, los cuales permiten completar la simulación del hidrograma total en un punto de salida de la cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

No obstante, HEC-HMS presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas durante su aplicación. Al tratarse de un modelo hidrológico conceptual y determinístico, sus resultados dependen de la calidad de los datos de entrada, de la selección adecuada de métodos hidrológicos y de la correcta estimación de sus parámetros. Asimismo, el software no representa con el mismo nivel de detalle procesos hidráulicos complejos, por lo que algunos fenómenos pueden requerir el uso complementario de modelos hidráulicos especializados (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.7.1. Componentes físicos y de configuración en HEC-HMS

La estructura de un modelo hidrológico en HEC-HMS se organiza a partir de componentes que permiten representar la cuenca, la información meteorológica, el periodo de simulación y las series de datos necesarias para el cálculo hidrológico. Estos componentes funcionan de manera integrada, debido a que la respuesta hidrológica simulada depende de la relación entre la estructura física de la cuenca, los datos hidrometeorológicos disponibles, los métodos hidrológicos seleccionados y las especificaciones temporales del análisis (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El modelo de cuenca constituye el componente físico principal dentro de HEC-HMS, ya que permite representar la red de drenaje mediante elementos hidrológicos como subcuencas, tramos de cauce, uniones, reservorios, fuentes, sumideros y derivaciones. Estos elementos se conectan dentro de una estructura hidrológica que permite simular el desplazamiento del agua desde las áreas de aporte hasta un punto de salida, considerando la generación, concentración y propagación del caudal dentro del sistema modelado (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El modelo meteorológico permite incorporar la información climática necesaria para la simulación hidrológica. Entre las variables que pueden incluirse se encuentran la precipitación, temperatura, evapotranspiración, radiación solar, velocidad del viento, presión atmosférica y procesos asociados al deshielo, dependiendo del tipo de estudio y de los métodos seleccionados. En los modelos lluvia-escorrentía, la precipitación constituye una de las variables de entrada más importantes, debido a que condiciona la generación de escorrentía, la magnitud de los caudales simulados y la forma del hidrograma resultante (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Las especificaciones de control definen el periodo temporal de simulación, la fecha de inicio, la fecha de término y el intervalo de cálculo del modelo. Este componente establece la escala temporal en la que se procesan los datos de entrada y se generan los resultados de caudal.

La selección del intervalo de cálculo debe ser coherente con la resolución temporal de la información hidrometeorológica disponible y con el tipo de respuesta hidrológica que se busca representar (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Además de los componentes físicos, meteorológicos y temporales, HEC-HMS incorpora diversos métodos hidrológicos que permiten representar los procesos fundamentales del ciclo lluvia-escorrentía. Estos métodos se agrupan según la función que desempeñan dentro del modelo, incluyendo procedimientos para estimar las pérdidas por infiltración, transformar la precipitación efectiva en escorrentía directa, representar el flujo base y realizar el tránsito de caudales a través de los cauces (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

La selección de los métodos hidrológicos constituye un aspecto relevante en la conceptualización de un modelo, debido a que influye en la estimación de variables como el volumen de escorrentía, el tiempo de respuesta de la cuenca, el caudal pico y la forma de los hidrogramas simulados. Por ello, la comprensión de los componentes y métodos disponibles en HEC-HMS resulta fundamental para el desarrollo de estudios hidrológicos orientados al análisis y simulación del comportamiento de las cuencas hidrográficas (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

2.7.2. Integración con herramientas geoespaciales: QGIS y Python

La integración de herramientas geoespaciales y lenguajes de programación constituye un apoyo importante dentro del modelamiento hidrológico, debido a que permite procesar, organizar y analizar información espacial y temporal asociada a una cuenca hidrográfica. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica facilitan el manejo de datos territoriales como modelos digitales de elevación, límites de cuenca, red de drenaje, pendiente, uso y cobertura del suelo, tipos de suelo y otros insumos necesarios para representar las características físicas del área de estudio. Asimismo, la calidad, resolución y discretización de los datos de

entrada influyen directamente en los resultados de la modelización hidrológica, por lo que su preparación espacial constituye una etapa relevante en la construcción de modelos de cuenca (Gomariz Castillo & Alonso Sarría, 2018).

QGIS constituye una herramienta geoespacial que permite visualizar, editar, procesar y analizar información espacial en formatos vectoriales y ráster. En estudios hidrológicos, su utilidad se relaciona con la capacidad de integrar información topográfica, cartográfica y temática para apoyar la delimitación de áreas de aporte, la generación de redes de drenaje, el cálculo de parámetros morfométricos, la elaboración de mapas temáticos y la preparación de insumos espaciales requeridos por modelos hidrológicos. De esta manera, QGIS contribuye a organizar la información territorial dentro de un entorno geoespacial coherente y favorece la interpretación de la variabilidad espacial de la cuenca (El-Bagoury & Gad, 2024).

Por su parte, Python constituye un lenguaje de programación que permite desarrollar rutinas para el tratamiento, automatización y análisis de datos. En el ámbito hidrológico, su aplicación facilita el procesamiento de series temporales, la organización de datos espaciales derivados de herramientas SIG, el cálculo de parámetros, la generación de gráficos y la sistematización de resultados. En ese sentido, el uso de Python contribuye a mejorar la trazabilidad, reproducibilidad y flexibilidad de los procesos de análisis, especialmente cuando se trabaja con flujos de modelamiento que integran información espacial y cálculos hidrológicos (Almeida-Ñauñay et al., 2025).

2.8. Marco conceptual

El marco conceptual reúne los términos principales que orientan la comprensión del modelamiento hidrológico semidistribuido y de la discretización espacial mediante Unidades de Respuesta Hidrológica. Estos conceptos permiten precisar el sentido técnico de las variables y procesos vinculados con la representación de la cuenca, la generación de escorrentía, la

simulación de caudales y la evaluación de los resultados obtenidos a partir de modelos hidrológicos.

2.8.1. Definiciones operacionales

Cuenca hidrográfica.

Es el área territorial delimitada por divisorias topográficas, dentro de la cual las aguas provenientes de la precipitación drenan hacia un punto común de salida. En el modelamiento hidrológico, la cuenca constituye la unidad espacial principal para representar los procesos de precipitación, infiltración, escorrentía, almacenamiento y tránsito de caudales (Chow et al., 1994).

Modelamiento hidrológico.

Es el proceso mediante el cual se representa, de forma simplificada, el comportamiento hidrológico de una cuenca a partir de datos físicos, hidrometeorológicos y parámetros asociados a los procesos del ciclo hidrológico. Su finalidad es simular la respuesta de una cuenca frente a determinadas condiciones de precipitación, almacenamiento, escorrentía y propagación del flujo (Chow et al., 1994).

Modelo hidrológico semidistribuido.

Es un tipo de modelo que representa la cuenca mediante unidades espaciales diferenciadas, sin llegar al nivel de detalle de un modelo completamente distribuido. Este enfoque permite incorporar la variabilidad espacial de características físicas como pendiente, cobertura del suelo, tipo de suelo, precipitación y parámetros hidrológicos, manteniendo una estructura de modelamiento computacionalmente manejable (Beven, 2012).

Discretización espacial.

Es el proceso mediante el cual una cuenca hidrográfica se divide en unidades menores de análisis, con el propósito de representar de manera diferenciada su heterogeneidad física e

hidrológica. La discretización permite organizar espacialmente los parámetros del modelo y mejorar la representación de los procesos que intervienen en la generación y propagación del caudal (Arnold et al., 1998).

Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs).

En HEC-HMS, las áreas tributarias continuas se representan mediante elementos Subbasin, los cuales cuentan con un punto de salida y parámetros físicos e hidrológicos para representar la generación de escorrentía (U.S. Army Corps of Engineers, 2026). Para efectos de la presente investigación, cada elemento Subbasin fue considerado operacionalmente como una Unidad de Respuesta Hidrológica. Esta equivalencia es específica del enfoque adoptado en el estudio, puesto que las URHs clásicas se definen principalmente mediante la combinación de características relativamente homogéneas de suelo, cobertura y pendiente (Arnold et al., 1998).

Caudal natural.

Es el caudal que representa el comportamiento hidrológico de una cuenca bajo condiciones naturales o sin considerar alteraciones antrópicas significativas, como regulación por embalses, derivaciones, retornos o extracciones. Este concepto permite analizar la disponibilidad hídrica asociada a la respuesta propia del sistema hidrológico (Dingman, 2015).

Precipitación efectiva.

La precipitación efectiva corresponde a la parte de la precipitación total que, luego de descontar las pérdidas iniciales, infiltración, retención superficial e intercepción, contribuye directamente a la generación de escorrentía. Este concepto se vincula con los métodos de pérdidas hidrológicas, como el método del Número de Curva (SCS-CN), los cuales permiten estimar la porción de lluvia que puede transformarse posteriormente en escorrentía directa dentro de un modelo lluvia-escorrentía (Natural Resources Conservation Service, 2004).

Escorrentía superficial y subsuperficial.

La escorrentía superficial se refiere al flujo de agua que se desplaza sobre la superficie del terreno cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración o cuando el suelo se encuentra saturado. La escorrentía subsuperficial corresponde al flujo que ocurre dentro de las capas superiores del suelo y que puede contribuir de manera retardada al caudal del cauce. Ambos componentes forman parte de la respuesta hidrológica de una cuenca frente a la precipitación y permiten comprender la transformación de la lluvia en caudal (Chow et al., 1994).

Método del Número de Curva (CN).

El método del Número de Curva, conocido como SCS-CN, es un procedimiento empírico utilizado para estimar la precipitación efectiva y la escorrentía directa a partir de la precipitación total, el uso y cobertura del suelo, el tipo hidrológico del suelo y la condición antecedente de humedad. El valor de CN representa la capacidad potencial de una superficie para generar escorrentía, por lo que permite diferenciar áreas con mayor o menor tendencia al escurrimiento dentro de una cuenca o unidad espacial de análisis (Natural Resources Conservation Service, 2004).

HEC-HMS.

El Hydrologic Modeling System es un software de modelamiento hidrológico desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, utilizado para simular procesos de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas. Esta herramienta permite integrar modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control, series de datos y métodos hidrológicos orientados a representar pérdidas, transformación lluvia-escorrentía, flujo base y tránsito de caudales. En estudios de modelamiento hidrológico, HEC-HMS puede emplearse para representar cuencas hidrográficas y generar caudales simulados bajo diferentes escenarios de discretización espacial (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración se define como el tiempo requerido para que el agua proveniente del punto hidráulicamente más alejado de la cuenca llegue hasta el punto de salida. Este parámetro es importante porque permite caracterizar la rapidez de respuesta hidrológica de una cuenca y se relaciona con la forma del hidrograma, el tiempo al pico y la propagación de la escorrentía hacia el punto de salida de la cuenca (Chow et al., 1994).

Tránsito de avenidas.

El tránsito de avenidas es el proceso mediante el cual un hidrograma se transforma conforme el caudal se desplaza a través de un cauce, tramo de río o sistema de almacenamiento. Este proceso permite representar la atenuación, el desfase temporal y la propagación de los caudales hacia un punto de salida. En HEC-HMS, el tránsito de avenidas puede representarse mediante métodos hidrológicos como Muskingum, entre otros, dependiendo de las características del cauce y de la información disponible (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Caudal base.

El caudal base corresponde a la contribución sostenida al caudal de un río proveniente principalmente del almacenamiento subterráneo, descarga de acuíferos y aportes retardados del sistema hidrológico. Este componente permite representar la parte del hidrograma que no depende únicamente de la escorrentía superficial inmediata, sino también de los aportes que mantienen el flujo durante periodos sin precipitación directa (Mao et al., 2024).

Hidrogramas.

Un hidrograma es la representación de la variación del caudal en función del tiempo en un punto determinado de una cuenca. En el modelamiento hidrológico, los hidrogramas permiten analizar la magnitud del caudal, el tiempo de respuesta, el caudal pico, la rama de recesión y el volumen total generado durante un evento o periodo de simulación (U.S. Army

Corps of Engineers, 2026).

Volumen bajo el hidrograma.

El volumen bajo el hidrograma es una variable hidrológica que representa la cantidad total de agua que escurre por una sección de control durante un intervalo de tiempo determinado. Matemáticamente, se obtiene mediante la integración del caudal respecto al tiempo y se expresa generalmente en unidades de volumen, como metros cúbicos (m^3). Esta variable permite cuantificar la respuesta global de una cuenca frente a un evento de precipitación o durante un periodo de análisis, siendo utilizada para evaluar la magnitud del escurrimiento generado y la contribución total de agua al cauce (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Caudal natural diario simulado.

En la presente investigación, la expresión caudal natural diario simulado se emplea en sentido operacional para identificar la serie de caudales generada por HEC-HMS bajo los datos, métodos, parámetros y condiciones iniciales adoptados en cada escenario de discretización espacial. La configuración del modelo no representó explícitamente embalses, derivaciones, retornos, extracciones ni reglas de operación hidráulica. Los resultados fueron obtenidos inicialmente con la resolución computacional establecida en HEC-HMS y posteriormente procesados y reportados a escala diaria. En consecuencia, el término natural describe únicamente la configuración operacional del modelo y no implica que los resultados constituyan una serie observada naturalizada ni una reproducción calibrada o validada del régimen natural real de la cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

Métricas de distancia entre series hidrológicas.

Son indicadores que permiten cuantificar la separación entre dos series de caudales, considerando la magnitud promedio de las diferencias, la diferencia relativa, la presencia de errores elevados y la tendencia sistemática a presentar valores mayores o menores respecto a

una serie de comparación. En esta investigación, estas métricas incluyen el error absoluto medio, el error absoluto medio relativo, el error cuadrático medio y el sesgo medio, los cuales permiten evaluar la variación de los caudales naturales diarios simulados entre escenarios de discretización espacial (Willmott & Matsuura, 2005). Asimismo, se consideran aportes metodológicos adicionales para la interpretación de errores en modelos hidrológicos (Chai & Draxler, 2014), así como enfoques integrales de evaluación del desempeño de modelos (Gupta et al., 2009).

Contraste hidrométrico complementario.

Es la comparación auxiliar entre los caudales simulados y una serie hidrométrica observada disponible. En esta investigación, la estación de aforo Sayán se utilizó como referencia hidrométrica complementaria para contextualizar la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales naturales diarios simulados. Sin embargo, debido a la posible influencia de regulación hidráulica aguas arriba, esta comparación no fue asumida como calibración o validación estricta del modelo (Moriasi et al., 2007). Este enfoque se sustenta en criterios ampliamente utilizados para la evaluación de modelos hidrológicos en condiciones de información limitada (Krause et al., 2005).

Métricas de similitud entre series hidrológicas.

Son indicadores que permiten evaluar el grado de asociación temporal entre dos series de caudales. En esta investigación, se consideran los coeficientes de Pearson y Spearman para analizar la similitud lineal y monotónica entre los hidrogramas comparados (Pearson, 1895). Asimismo, se incorpora el coeficiente de Spearman como medida no paramétrica de correlación (Spearman, 1904), complementando los criterios de evaluación del desempeño hidrológico propuestos en la literatura especializada (Krause et al., 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo aplicada y de enfoque cuantitativo. Fue aplicada porque se orientó a evaluar un problema técnico relacionado con la representación espacial de la cuenca del río Huaura dentro de un modelo hidrológico semidistribuido. Específicamente, se analizó la influencia del nivel de discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) sobre los caudales naturales diarios simulados.

El enfoque fue cuantitativo porque el estudio se basó en el procesamiento, la simulación y la comparación de datos numéricos de precipitación, área, pendiente, Número de Curva, tiempos de concentración, tiempos de retardo, parámetros de tránsito, caudales simulados y volúmenes bajo los hidrogramas. La respuesta obtenida en cada escenario fue evaluada mediante estadísticos descriptivos, métricas de distancia y sesgo, coeficientes de correlación y variaciones porcentuales respecto al escenario de mayor discretización espacial.

La investigación empleó la simulación computacional como estrategia para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo diferentes niveles de discretización. Su propósito no fue calibrar el modelo para reproducir exactamente los caudales observados ni estimar los caudales reales definitivos de la cuenca, sino comparar la respuesta relativa de los escenarios cuando fueron evaluados bajo criterios metodológicos homogéneos.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño correspondió a un experimento computacional comparativo desarrollado mediante simulación hidrológica y análisis de sensibilidad determinístico. El factor de análisis fue el nivel de discretización espacial de la cuenca, representado por el número de Unidades de

Respuesta Hidrológica. Este factor fue evaluado en siete niveles: 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs.

La manipulación del factor se realizó exclusivamente dentro de escenarios virtuales configurados en HEC-HMS. Por consiguiente, no se desarrolló un experimento de campo, no se asignaron unidades de estudio aleatoriamente ni se modificaron físicamente las condiciones de la cuenca. Cada escenario constituyó una configuración alternativa del mismo sistema hidrológico.

Para mantener condiciones comparables, en todos los escenarios se utilizaron el mismo Modelo Digital de Elevaciones, el mismo límite general de la cuenca, el mismo punto de salida en Sayán, las mismas estaciones pluviométricas, los mismos periodos de simulación y los mismos métodos hidrológicos. También se mantuvieron los mismos procedimientos de estimación y asignación de parámetros. Las variaciones en la geometría, el número de elementos y los valores distribuidos de los parámetros fueron consecuencia directa del cambio de discretización espacial.

Los siete niveles fueron seleccionados intencionalmente como escenarios de modelamiento y no como una muestra probabilística. Su disposición progresiva permitió evaluar la sensibilidad de los caudales naturales diarios simulados y de los volúmenes bajo los hidrogramas frente al incremento del número de URHs.

El análisis se efectuó mediante comparaciones internas entre los escenarios, considerando el modelo de 153 URHs como referencia de mayor detalle espacial. En consecuencia, los resultados expresan la sensibilidad relativa del modelo ante la discretización espacial y no constituyen una calibración hidrométrica ni una demostración de exactitud absoluta respecto a los caudales observados.

3.2. Área de estudio

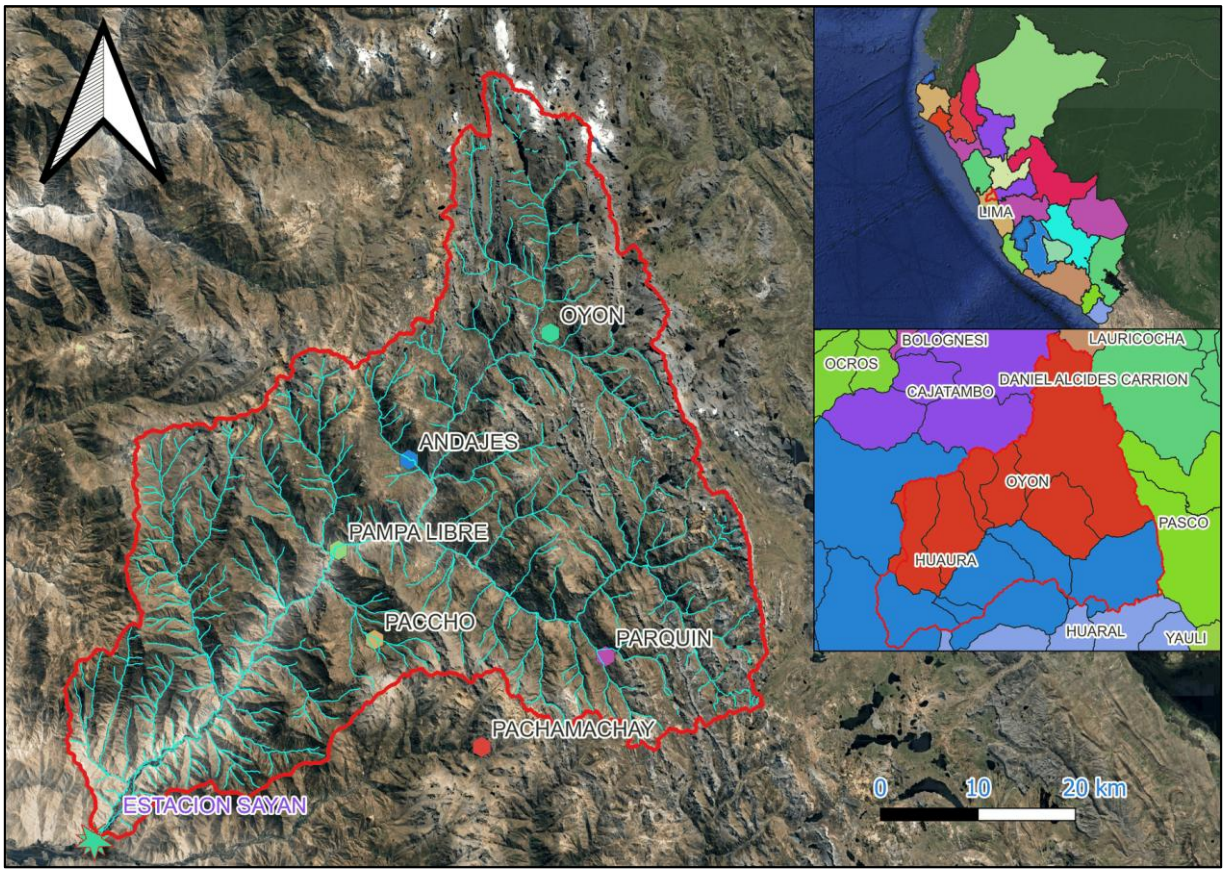
3.2.1. Ubicación geográfica

El área de estudio correspondió a la cuenca del río Huaura, ver Figura 6, ubicada en la costa central del Perú, en el departamento de Lima. Esta cuenca constituye un sistema hidrográfico de importancia regional, debido a que su dinámica hidrológica se encuentra asociada a la disponibilidad hídrica, al uso del recurso agua y a la variabilidad espacial de las condiciones físicas e hidrometeorológicas presentes en el territorio.

La cuenca del río Huaura presenta diferencias altitudinales, variabilidad en la distribución espacial de la precipitación, cambios en el uso y cobertura del suelo, pendientes variables y una red de drenaje que condiciona la generación y propagación del caudal. Estas características hacen necesaria una representación espacial adecuada dentro del modelo hidrológico, a fin de evaluar la influencia del nivel de discretización en la generación de caudales naturales diarios simulados.

Figura 6

Ubicación geográfica de la cuenca del río Huaura y de la estación de aforo Sayán



3.2.2. Estación hidrométrica de referencia

La estación de aforo Sayán fue considerada como referencia hidrométrica disponible para el contraste complementario de los caudales naturales diarios simulados. Esta estación permitió contar con una serie observada para analizar la magnitud general y el comportamiento temporal de los resultados generados por el modelo HEC-HMS en cada escenario de discretización espacial.

No obstante, la interpretación de la información hidrométrica se realizó considerando las posibles limitaciones asociadas a la regulación hidráulica existente aguas arriba. Por ello, la comparación entre los resultados simulados y la información de Sayán no fue asumida como un

proceso de calibración o validación estricta, sino como un contraste estadístico complementario frente a una referencia hidrométrica disponible. De esta manera, la estación fue empleada para contextualizar la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales simulados.

3.2.3. Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca se realizó a partir de información topográfica derivada de un modelo digital de elevaciones, el cual permitió identificar la red de drenaje, las direcciones de flujo, la acumulación de flujo y el punto de salida asociado a la estación de aforo Sayán. Esta información sirvió como base para la construcción de los escenarios de discretización espacial y para la estimación de parámetros morfométricos requeridos en el modelamiento hidrológico.

El procesamiento topográfico permitió definir el área tributaria de la cuenca, las unidades espaciales de aporte, los cauces principales y los elementos necesarios para representar la estructura hidrológica del sistema. A partir de esta delimitación se establecieron los escenarios de discretización espacial en URHs, los cuales fueron posteriormente incorporados en el modelo hidrológico HEC-HMS.

3.3. Unidad de análisis, población y muestra

3.3.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo conformada por los escenarios de discretización espacial definidos mediante Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Huaura. Cada escenario representó una configuración espacial diferente de la cuenca, con un número determinado de unidades hidrológicas utilizadas para organizar la información física, hidrológica y geoespacial dentro del modelo.

Asimismo, cada escenario permitió evaluar la respuesta hidrológica simulada a partir de una estructura espacial específica. En ese sentido, la unidad de análisis no correspondió a individuos o elementos poblacionales tradicionales, sino a configuraciones espaciales del

modelo hidrológico, cuya comparación permitió analizar la influencia del nivel de discretización en los caudales naturales diarios simulados.

3.3.2. Población

La población de estudio estuvo constituida por los posibles escenarios de discretización espacial que podrían generarse para la cuenca del río Huaura y por los caudales naturales diarios simulados asociados a cada configuración. Debido a que existen múltiples formas de subdividir una cuenca en unidades espaciales, el universo de análisis se consideró amplio y dependiente de los criterios técnicos adoptados para representar espacialmente el sistema hidrológico.

En términos metodológicos, la población incluyó todas las posibles configuraciones de discretización que podrían construirse modificando el número, tamaño, distribución y características de las unidades hidrológicas dentro de la cuenca. Sin embargo, para efectos de la presente investigación, se seleccionaron escenarios específicos que permitieron representar distintos niveles de detalle espacial.

3.3.3. Muestra

La muestra fue de tipo no probabilístico e intencional, y estuvo conformada por siete escenarios de discretización espacial: 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs. Estos escenarios fueron seleccionados con el propósito de representar distintos niveles de detalle espacial y evaluar si el incremento progresivo del número de URHs generaba variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados y en los volúmenes bajo los hidrogramas.

La selección de estos siete escenarios permitió comparar configuraciones espaciales con diferentes grados de subdivisión de la cuenca. De esta manera, se buscó identificar si una mayor cantidad de unidades de respuesta hidrológica producía mejoras sustanciales en la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada del modelo o si, por el contrario, incrementaba la complejidad sin generar cambios relevantes en los resultados simulados.

3.4. Variables de investigación

3.4.1. Variable independiente

La variable independiente fue el nivel de discretización espacial en Unidades de Respuesta Hidrológica. Esta variable se expresó mediante el número de URHs considerado en cada escenario de modelamiento: 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 unidades. Cada nivel de discretización representó una forma distinta de organizar espacialmente la cuenca y de incorporar sus características físicas e hidrológicas dentro del modelo semidistribuido.

El nivel de discretización espacial permitió evaluar el efecto de subdividir la cuenca en unidades progresivamente más detalladas. En ese sentido, esta variable se relacionó directamente con la representación de la heterogeneidad territorial, la asignación de parámetros hidrológicos y la forma en que el modelo integró las características físicas de la cuenca en el proceso de simulación.

3.4.2. Variable dependiente

La variable dependiente estuvo conformada por los caudales naturales diarios simulados y los volúmenes bajo los hidrogramas generados en cada escenario de discretización espacial.

Estos resultados permitieron evaluar la respuesta hidrológica simulada por HEC-HMS y analizar la variación de cada escenario respecto al conjunto de escenarios de discretización espacial, considerando principalmente el escenario de 153 URHs como referencia interna de mayor detalle espacial.

Los caudales naturales diarios simulados constituyeron la salida principal del modelo hidrológico para cada escenario de discretización espacial. Estos valores fueron generados por HEC-HMS bajo los métodos, parámetros, condiciones iniciales y supuestos adoptados en la investigación, sin representar explícitamente la operación de la infraestructura hidráulica existente en la cuenca. Los resultados fueron procesados y reportados a escala diaria para la

construcción de los hidrogramas, el cálculo de los volúmenes acumulados y la aplicación de las métricas de distancia, sesgo y similitud. Su interpretación se limitó a la comparación interna entre escenarios y no correspondió a una serie naturalizada o validada del régimen real de la cuenca.

3.4.3. Indicadores de evaluación

Los principales indicadores de evaluación fueron los hidrogramas simulados, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, métricas de distancia, métricas de sesgo y coeficientes de correlación entre series hidrológicas. Estos indicadores permitieron analizar si el incremento del número de URHs generaba variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados y si los resultados tendían a estabilizarse respecto al escenario de mayor discretización espacial.

De manera complementaria, se consideraron criterios de coherencia hidrológica relacionados con la forma general de los hidrogramas, la continuidad de las series simuladas, la respuesta frente a los periodos de precipitación y la consistencia de los volúmenes obtenidos. Estos criterios no tuvieron como finalidad principal desarrollar un proceso exhaustivo de calibración y validación, sino verificar que los resultados simulados fueran compatibles con el comportamiento hidrológico esperado de la cuenca.

Con el propósito de establecer la correspondencia entre las variables de investigación, sus dimensiones, indicadores y procedimientos de evaluación, en la Tabla 3 se presenta la matriz de operacionalización utilizada en el estudio. La matriz diferencia los indicadores empleados para la comparación interna de los escenarios de discretización espacial de aquellos utilizados exclusivamente para el contraste hidrométrico complementario con la estación Sayán.

Tabla 3

Matriz de operacionalización de las variables de investigación

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad o escala	Fuente de información	Procedimiento
Variable independiente: nivel de discretización espacial en URHs	Grado de subdivisión de la cuenca del río Huaura en áreas tributarias representadas mediante elementos Subbasin en HEC-HMS.	Nivel de subdivisión espacial	Número de URHs por escenario: 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153	Número de unidades	Delimitaciones generadas en HEC-HMS a partir del mismo DEM y punto de salida en Sayán	Conteo de las áreas tributarias resultantes en cada escenario de discretización.
Variable independiente: nivel de discretización espacial en URHs	Grado de subdivisión de la cuenca mediante la modificación del área mínima empleada para definir los cauces.	Umbral de delimitación	Área mínima de drenaje: 500, 200, 150, 85, 55, 25 y 10 km²	km²	Herramienta Area to Define Streams de HEC-HMS	Modificación progresiva del umbral, manteniendo el mismo DEM y punto de salida.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Comportamiento temporal de los caudales naturales diarios generados por HEC-HMS para cada escenario.	Respuesta temporal	Serie de caudales naturales diarios simulados e hidrograma de salida	m³/s	Resultados de HEC-HMS v.4.13.0 en el punto de salida de la cuenca	Extracción y organización cronológica de los caudales simulados para enero-mayo de 2016, 2017 y 2018.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Magnitud y distribución estadística de los caudales simulados.	Magnitud del caudal	Media, mediana, P25, P75, P90 y caudal	m³/s	Series diarias exportadas de HEC-HMS	Cálculo de estadísticos descriptivos para cada escenario y

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad o escala	Fuente de información	Procedimiento
			máximo diario simulado			periodo mediante Python.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Cantidad acumulada de agua representada bajo el hidrograma simulado.	Respuesta volumétrica	Volumen mensual y volumen total bajo el hidrograma	hm^3	Series de caudales simulados en HEC-HMS	Integración discreta del caudal respecto al tiempo y conversión del resultado a hm^3.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Diferencia de magnitud entre cada escenario y el escenario de 153 URHs utilizado como referencia interna.	Distancia entre series	MAE	m^3/s	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	Promedio de las diferencias absolutas entre cada escenario y la serie de 153 URHs.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Diferencia relativa respecto a la serie de referencia interna.	Distancia relativa	MRAE	%	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	División del MAE entre el caudal medio del escenario de 153 URHs y multiplicación por 100.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Magnitud cuadrática de las diferencias, con mayor sensibilidad a discrepancias elevadas.	Distancia cuadrática	RMSE	m^3/s	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	Raíz cuadrada del promedio de las diferencias cuadráticas respecto al escenario de 153 URHs.

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad o escala	Fuente de información	Procedimiento
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Tendencia sistemática de un escenario a presentar caudales mayores o menores que la referencia interna.	Sesgo entre series	Sesgo medio	m^3/s	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	Promedio de las diferencias con signo entre cada escenario y el escenario de 153 URHs.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Grado de asociación temporal entre los hidrogramas simulados.	Similitud temporal	Coeficiente de Pearson	Adimensional, de −1 a 1	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	Cálculo de la asociación lineal entre cada escenario y la serie de 153 URHs.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Grado de asociación monotónica entre los rangos de los caudales simulados.	Similitud temporal	Coeficiente de Spearman	Adimensional, de −1 a 1	Series diarias simuladas y procesadas mediante Python	Cálculo de la correlación por rangos entre cada escenario y la serie de 153 URHs.
Variable dependiente: respuesta hidrológica simulada	Comparación auxiliar entre los resultados simulados y la referencia hidrométrica disponible en Sayán.	Contraste hidrométrico complementario	Pearson, Spearman, NSE y PBIAS	Pearson, Spearman y NSE: adimensionales; PBIAS: %	Caudales simulados y registros diarios de la estación Sayán	Comparación de cada escenario con Sayán, interpretada exclusivamente como contraste complementario y no como calibración o validación hidrométrica estricta.

3.5. Fuentes de información y datos de entrada

Para el desarrollo del modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura se emplearon diferentes fuentes de información hidrometeorológica, topográfica y geoespacial, las cuales permitieron representar las condiciones físicas e hidrológicas del área de estudio. Estos datos fueron utilizados en las etapas de delimitación de la cuenca, caracterización de las Unidades de Respuesta Hidrológica, construcción del modelo meteorológico, estimación de parámetros hidrológicos, configuración del modelo HEC-HMS y evaluación de los resultados simulados.

En la Tabla 4 se presentan las principales fuentes de información utilizadas en la investigación, indicando el tipo de dato, la fuente general, la resolución o periodo de análisis y el uso específico dentro del procedimiento metodológico.

Tabla 4

Fuentes de información y datos de entrada utilizados en la investigación

Información	Fuente	Periodo / resolución	Uso en la investigación
Precipitación	Estaciones pluviométricas ubicadas dentro o próximas al área de influencia de la cuenca del río Huaura	Registros diarios correspondientes a los periodos de simulación 2016, 2017 y 2018	Construcción del modelo meteorológico y distribución espacial de la precipitación mediante distancia inversa ponderada
Caudal registrado en Sayán	Estación de aforo Sayán	Registros diarios correspondientes a los periodos de análisis	Cálculo de hidrogramas observados, estadísticos descriptivos y volumen observado en Sayán para el contraste hidrométrico complementario con los resultados simulados, considerando las limitaciones asociadas a la posible regulación hidráulica aguas arriba
Modelo Digital de Elevaciones (DEM)	Información topográfica digital empleada para representar el relieve de la cuenca	Resolución espacial del producto topográfico utilizado	Delimitación de la cuenca, generación de la red de drenaje, cálculo de pendientes, áreas de aporte y parámetros morfométricos
Uso y cobertura del suelo	Información cartográfica de uso y cobertura del suelo	Clasificación espacial de coberturas presentes en la cuenca	Caracterización de las condiciones superficiales y apoyo en la estimación del Número de Curva
Número de Curva (CN)	Reclasificación hidrológica a partir del uso y cobertura del suelo y criterios del método SCS-CN	Valores asignados por unidad espacial o URH	Estimación de pérdidas hidrológicas y generación de precipitación efectiva en HEC-HMS

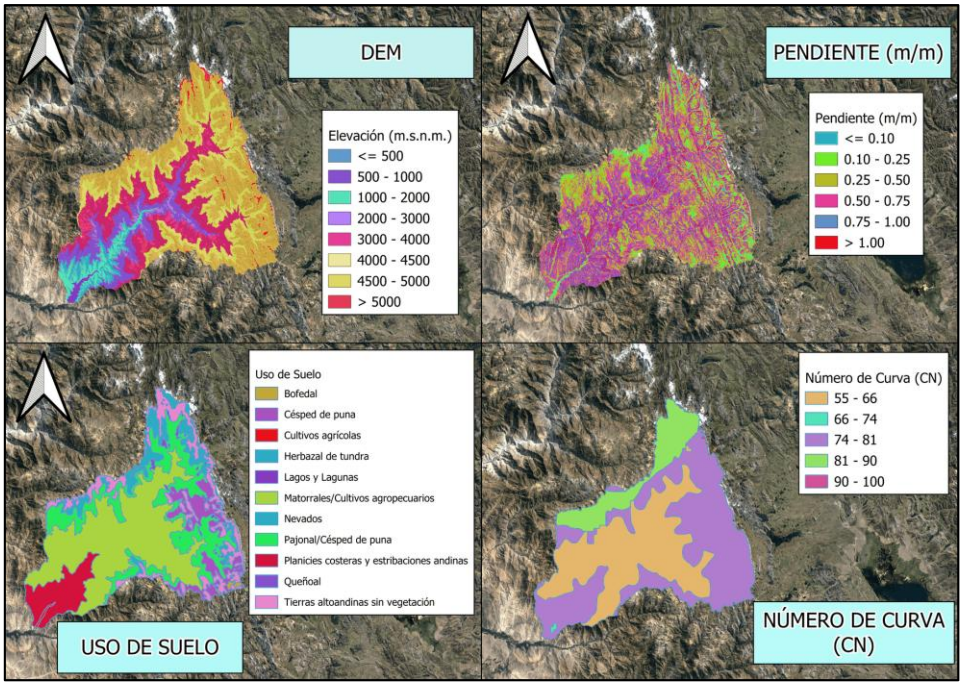
Información	Fuente	Periodo / resolución	Uso en la investigación
Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs)	Procesamiento geoespacial de la cuenca mediante QGIS y Python	Escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs	Representación de los diferentes niveles de discretización espacial evaluados en el modelo hidrológico
Parámetros morfométricos	Procesamiento del DEM y de las unidades espaciales generadas	Valores calculados para la cuenca y para cada unidad espacial	Configuración de parámetros hidrológicos asociados al tiempo de respuesta, tránsito de caudales y estructura del modelo de cuenca
Resultados simulados	Salidas generadas por HEC-HMS v.4.13.0	Series de caudales naturales diarios simulados para cada escenario	Cálculo de hidrogramas, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, MAE, MRAE, RMSE, sesgo medio, Pearson y Spearman para la comparación entre escenarios de discretización espacial

La organización de estos datos permitió establecer una secuencia metodológica coherente entre la información de entrada, el procesamiento hidrometeorológico y geoespacial, la configuración del modelo hidrológico y la evaluación de los resultados. Asimismo, permitió asegurar que los siete escenarios de discretización espacial fueran construidos y comparados bajo criterios homogéneos, de modo que las diferencias observadas en los caudales simulados y en los volúmenes bajo los hidrogramas pudieran atribuirse principalmente al nivel de discretización espacial adoptado.

En la siguiente Figura 7 se muestra los datos de entradas más relevante para la discretización de la cuenca del río Huaura.

Figura 7

Principales insumos geoespaciales empleados en la caracterización hidrológica de la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento de información geoespacial de elevación, pendiente, uso y cobertura del suelo y Número de Curva.

3.5.1. Información hidrometeorológica

La investigación utilizó información hidrometeorológica correspondiente a series de precipitación y caudal como se muestran en la Tabla 5. Los datos de precipitación fueron obtenidos a partir de estaciones pluviométricas ubicadas dentro o próximas al área de influencia de la cuenca del río Huaura. Esta información fue empleada para representar la distribución temporal de la lluvia y para generar los insumos meteorológicos requeridos por el modelo HEC-HMS.

La selección de estaciones pluviométricas consideró la disponibilidad de registros, continuidad temporal, ubicación espacial y relación con el área de estudio. Estos criterios permitieron seleccionar información representativa para la construcción del modelo meteorológico y para la distribución espacial de la precipitación en los diferentes escenarios de discretización.

La información hidrométrica correspondió a los caudales registrados en la estación de aforo Sayán. Esta serie fue empleada como referencia hidrométrica disponible para contextualizar la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales naturales diarios simulados. Debido a las posibles alteraciones antrópicas existentes aguas arriba, los registros hidrométricos fueron interpretados considerando las limitaciones propias de la serie observada, por lo que no fueron asumidos como una serie natural no regulada para calibración o validación estricta del modelo.

Tabla 5

Características de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en la investigación

Estación	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	Variable	Periodo
Andajes	Climática	292220.74	8807301.76	3950	Precipitación	2016-2018

Estación	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	Variable	Periodo
Oyón	Climática	306730.01	8820294.52	3667	Precipitación	2016-2018
Paccho	Climática	288692.09	8788840.86	3250	Precipitación	2016-2018
Pachamachay	Climática	299691.40	8777846.82	3175	Precipitación	2016-2018
Pampa Libre	Climática	284988.13	8798036.52	1756	Precipitación	2016-2018
Parquín	Climática	312387.30	8787140.63	3571	Precipitación	2016-2018
Sayán	Hidrométrica	259914.99	8768236.93	645	Caudal	2016-2018

3.5.2. Información topográfica

La información topográfica fue obtenida del archivo de elevación asociado al producto ALOS PALSAR de alta resolución con corrección radiométrica del terreno, distribuido por Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center [ASF DAAC], 2014). El archivo final utilizado, denominado DEM.elevation.tif, presentó una resolución espacial de 12.5 m y fue procesado en el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 18S (EPSG:32718).

A partir del DEM se realizó la delimitación de la cuenca, la generación de la red de drenaje, el cálculo de pendientes y la obtención de los parámetros morfométricos empleados en la construcción del modelo hidrológico.

El ráster procesado estuvo conformado por 5767 columnas y 6289 filas, con una extensión comprendida entre las coordenadas Este 256,905.75 y 328,993.25 m, y Norte 8,768 421.50 y 8,847 034.00 m. Las elevaciones válidas dentro del área procesada variaron entre 680 y 5,603 m s. n. m. Este insumo fue utilizado para delimitar la cuenca, generar la red de drenaje, calcular pendientes, determinar las áreas tributarias y obtener los parámetros morfométricos requeridos por el modelo hidrológico.

El modelo digital de elevaciones permitió representar las condiciones físicas que

controlan el desplazamiento del agua dentro de la cuenca. A partir de su procesamiento se generaron insumos espaciales fundamentales para la delimitación de unidades de respuesta hidrológica, la identificación de cauces y la configuración de los elementos hidrológicos en HEC-HMS.

3.5.3. Información de uso y cobertura del suelo

La información inicial de uso y cobertura del suelo y del Número de Curva fue obtenida mediante la descarga de capas vectoriales disponibles en el portal Geo GPS Perú. La capa de uso y cobertura del suelo fue empleada para identificar las principales condiciones superficiales presentes en la cuenca del río Huaura (Geo GPS Perú, 2023).

La capa inicial de Número de Curva fue descargada con intervalos de valores asociados a las condiciones superficiales representadas espacialmente (Geo GPS Perú, 2019). Durante el procesamiento se revisaron estos intervalos y se asignó un valor representativo de CN a cada rango, procurando que el valor seleccionado permaneciera dentro de sus límites y fuera coherente con el uso y cobertura del suelo correspondiente. El producto final fue almacenado y utilizado como insumo del método de pérdidas SCS-CN en HEC-HMS.

3.6. Procesamiento de datos hidrometeorológicos

3.6.1. Control de calidad y consistencia

El procesamiento de la información hidrometeorológica se orientó a garantizar la calidad, consistencia y continuidad de los datos utilizados en el modelamiento hidrológico. Para ello, las series de precipitación y caudal fueron revisadas con el propósito de identificar valores faltantes, registros atípicos, inconsistencias temporales y posibles errores de digitación o medición.

El control de calidad se aplicó de manera uniforme a las series diarias de precipitación de las estaciones Andajes, Oyón, Paccho, Pachamachay, Pampa Libre y Parquín. La revisión

comprendió exclusivamente los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018, correspondientes a 152, 151 y 151 registros diarios, respectivamente. En consecuencia, se evaluaron 454 fechas por estación y un total de 2,724 valores estación-día. No se identificaron fechas duplicadas, valores negativos ni registros faltantes dentro de los periodos utilizados en el modelamiento.

Como comprobación estadística exploratoria, se aplicó el criterio del rango intercuartílico a los registros de precipitación mayores que cero de cada estación. Los días sin precipitación fueron excluidos únicamente del cálculo de los cuartiles, debido a que su elevada frecuencia, especialmente en Pampa Libre y Andajes, podía producir límites superiores poco representativos. Los valores que superaron el límite $Q3 + 1.5 \times IQR$ fueron clasificados como candidatos para revisión y no directamente como errores de medición. Los resultados de este control se resumen en la Tabla A5.

La comparación entre las series originales y las series preparadas para HEC-HMS confirmó una coincidencia completa en las seis estaciones. No se encontraron diferencias entre los 2,724 valores comparados, por lo que no se efectuaron imputaciones, sustituciones ni correcciones de los registros de precipitación. Los valores altos identificados por el criterio estadístico fueron conservados, debido a que la condición de valor atípico no constituye por sí sola evidencia de error y su modificación habría requerido información adicional de campo o documentación de la estación. En consecuencia, el modelo HEC-HMS utilizó las series originales sin alteraciones.

3.6.2. Procesamiento de precipitación

En el caso de la precipitación, se realizó una evaluación de la consistencia de las series disponibles mediante procedimientos de comparación entre estaciones, análisis gráfico y revisión de tendencias acumuladas. Esta etapa permitió identificar posibles cambios en el comportamiento de los registros y seleccionar las estaciones con mayor representatividad para

la cuenca del río Huaura.

Posteriormente, las series de precipitación fueron organizadas en una escala temporal compatible con el modelo hidrológico y con la generación de caudales naturales diarios simulados. La información fue estructurada en tablas de entrada, verificando la correspondencia entre fechas, estaciones, valores de precipitación y periodos de simulación.

3.6.3. Procesamiento de caudales

La serie hidrométrica de la estación de aforo Sayán fue procesada para obtener hidrogramas observados, caudales máximos, estadísticos descriptivos y volúmenes acumulados durante los periodos de análisis. Esta información fue utilizada como referencia hidrométrica disponible para contraste complementario con los resultados simulados, considerando que los registros observados pueden estar influenciados por regulación hidráulica aguas arriba.

El procesamiento de caudales incluyó la revisión de la continuidad temporal de la serie, la organización de los registros diarios, el cálculo de estadísticos descriptivos y la estimación del volumen acumulado en la estación de aforo Sayán durante cada periodo de análisis. Esta información permitió disponer de una referencia hidrométrica complementaria para contextualizar los resultados simulados y analizar sus diferencias respecto a la serie observada disponible.

3.6.4. Obtención del volumen observado en Sayán y limitaciones de la referencia hidrométrica

La cuenca del río Huaura presenta infraestructura hidráulica de regulación ubicada aguas arriba de la estación de aforo Sayán, la cual puede influir en los caudales registrados en dicho punto de control. Entre las principales estructuras de almacenamiento se encuentran los embalses Surasaca y Cochaquillo, cuyos procesos de almacenamiento y liberación de agua pueden modificar la respuesta hidrológica observada en la estación.

Debido a esta condición, los caudales registrados en la estación de aforo Sayán no representan necesariamente una respuesta natural no regulada de la cuenca, sino que pueden incorporar efectos asociados a la regulación hidráulica existente aguas arriba. Por ello, en la presente investigación, la información de Sayán fue utilizada como referencia hidrométrica disponible para contraste complementario, mas no como serie natural para calibración o validación estricta del modelo.

El volumen observado en la estación de aforo Sayán se obtuvo a partir de la integración de los caudales diarios respecto al tiempo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_{Sayán} = \sum_{i=1}^{n} Q_{obs,i} \times \Delta t \qquad \text{(Ec. 23)}$$

Donde:

$V_{Sayán}$ es el volumen registrado en la estación de aforo Sayán.

$Q_{obs,i}$ es el caudal observado en el tiempo i.

Δt es el intervalo de tiempo entre registros.

n es el número total de datos.

Si bien se reconoció la presencia de infraestructura de regulación en la cuenca alta, no se contó con información operativa suficiente sobre almacenamiento inicial, almacenamiento final, curvas cota-volumen, reglas de operación o descargas observadas de los embalses Surasaca y Cochaquillo para los periodos analizados. Por ello, dichos embalses no fueron incorporados como elementos Reservoir dentro de HEC-HMS ni como ajuste directo del volumen observado en Sayán.

En consecuencia, el volumen observado en la estación de aforo Sayán fue utilizado únicamente como descriptor hidrométrico complementario para contextualizar la magnitud de los resultados simulados. La evaluación principal de la investigación se centró en la

comparación estadística entre los escenarios de discretización espacial, considerando al escenario de 153 URHs como referencia interna de mayor discretización para analizar la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada.

3.6.5. Distribución espacial de la precipitación

La distribución espacial de la precipitación se realizó mediante el método de ponderación por distancia inversa incorporado en HEC-HMS. Para cada intervalo diario, la precipitación asignada a las unidades espaciales fue estimada a partir de los registros de las estaciones Andajes, Oyón, Paccho, Pachamachay, Pampa Libre y Parquín.

El método de distancia inversa ponderada considera que las estaciones pluviométricas más cercanas a una unidad espacial tienen mayor influencia sobre la precipitación estimada en dicha unidad, mientras que las estaciones más alejadas presentan una menor influencia. De esta manera, la precipitación asignada a cada URH se calculó a partir de una ponderación basada en la distancia entre la estación pluviométrica y la unidad de análisis.

Para cada URH se definió un único nodo de cálculo ubicado en su centroide espacial. Las coordenadas geográficas del centroide fueron ingresadas en HEC-HMS mediante sus valores de latitud y longitud, y al nodo se le asignó un peso espacial de 1.00. Los pesos de las estaciones pluviométricas fueron calculados internamente mediante el método de distancia inversa, mientras que el peso del nodo estableció su representatividad dentro de la unidad espacial. Debido a que cada URH contó con un solo nodo, la precipitación interpolada en dicho punto fue considerada representativa de la precipitación media asignada a toda la URH.

$$P_j = \alpha_j \sum_{i=1}^{n} w_{ij} P_i \qquad \text{(Ec. 24)}$$

Donde:

P_j es la precipitación estimada para la unidad espacial j, correspondiente a una URH.

α_j es el peso del nodo centroide dentro de la URH (j).

P_i es la precipitación registrada en la estación pluviométrica (i).

w_i es el peso asignado a la estación pluviométrica (i).

n es el número total de estaciones pluviométricas consideradas.

El peso de cada estación fue calculado en función de la distancia entre la estación pluviométrica y la unidad espacial de análisis, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$w_{ij} = \frac{{d_{ij}}^{-2}}{\sum_{k=1}^{n} {d_{kj}}^{-2}} \qquad \text{(Ec. 25)}$$

Donde:

w_i es el peso asignado a la estación pluviométrica (i).

$d_{i,j}$ es la distancia entre la estación pluviométrica (i) y la unidad espacial (j).

p es el exponente de ponderación del método de distancia inversa.

En la presente investigación se adoptó un exponente de ponderación $p = 2$, valor comúnmente empleado en aplicaciones del método de distancia inversa ponderada.

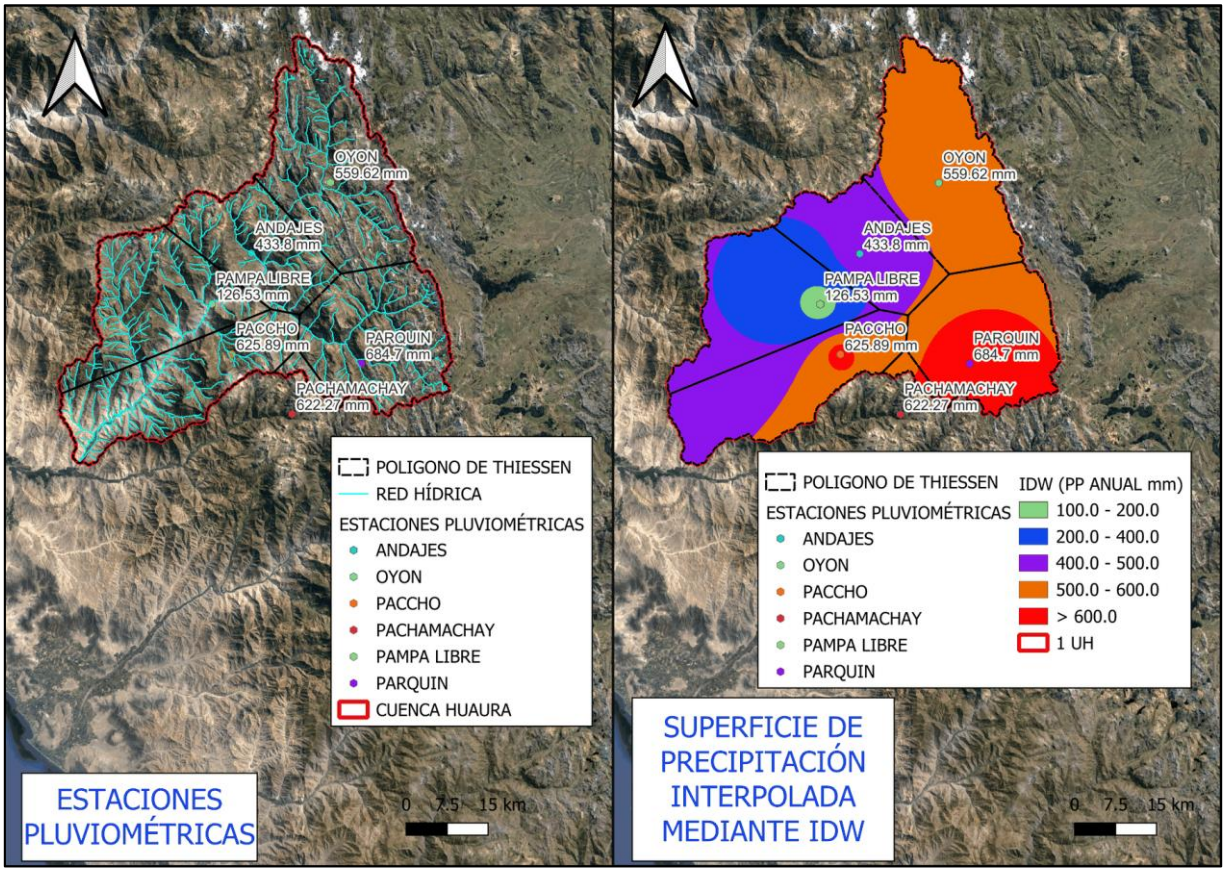
En este procedimiento, a menor distancia entre la estación pluviométrica y la URH, mayor fue el peso asignado a dicha estación en la estimación de la precipitación. Por el contrario, las estaciones más alejadas tuvieron menor influencia en el cálculo. De esta manera, se generaron entradas meteorológicas diferenciadas para las unidades espaciales del modelo, favoreciendo una representación más coherente de la precipitación en función de la distribución espacial de las estaciones disponibles.

La precipitación estimada mediante este procedimiento fue incorporada posteriormente en el modelo meteorológico de HEC-HMS, permitiendo que cada escenario de discretización espacial contara con una representación de lluvia compatible con la ubicación de sus URHs y con la información pluviométrica disponible para la cuenca del río Huaura.

Para representar la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca del río Huaura, los registros pluviométricos fueron interpolados mediante el método de distancia inversa ponderada. Este procedimiento permitió generar una superficie continua de precipitación a partir de los valores puntuales registrados en las estaciones meteorológicas consideradas. La Figura 8 muestra la ubicación de las estaciones empleadas, la superficie interpolada y la distribución de la precipitación dentro del área de modelamiento.

Figura 8

Distribución espacial de la precipitación mediante interpolación IDW en la cuenca del río Huaura



La distribución espacial obtenida permitió asignar valores de precipitación a las unidades espaciales del modelo hidrológico. De esta manera, la precipitación dejó de representarse

únicamente como un dato puntual por estación y pasó a incorporarse como una variable espacialmente distribuida dentro del proceso de modelamiento.

3.7. Procesamiento geoespacial y generación de URHs

3.7.1. Delimitación de la cuenca

El procesamiento geoespacial se realizó mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica, principalmente QGIS, con apoyo de procedimientos automatizados en Python cuando fue necesario. Esta etapa permitió preparar los insumos espaciales requeridos para la delimitación de la cuenca, la generación de la red de drenaje, el cálculo de parámetros morfométricos y la definición de los escenarios de discretización espacial.

El modelo digital de elevaciones, con resolución espacial de 12.5 m y sistema de referencia WGS 84/UTM zona 18S (EPSG:32718), fue incorporado como información de terreno en HEC-HMS v.4.13.0. Mediante las herramientas de preprocesamiento se corrigieron las depresiones del terreno y se generaron los rásteres de dirección y acumulación de flujo. Estos productos permitieron identificar la red de drenaje y delimitar el área tributaria correspondiente al punto de salida ubicado en la estación hidrométrica Sayán. El mismo DEM y el mismo punto de salida fueron utilizados en los siete escenarios, garantizando que las diferencias entre ellos correspondieran al nivel de discretización espacial.

La red de drenaje utilizada en la construcción de los escenarios no correspondió a una capa hidrográfica vectorial incorporada desde una fuente externa, sino que fue generada automáticamente en HEC-HMS a partir del mismo DEM procesado. En todos los escenarios se mantuvieron el modelo de elevaciones y el punto de salida ubicado en Sayán; únicamente se modificó el parámetro Area to Define Streams, cuyos valores se presentan en el apartado 3.7.4.

3.7.2. Cálculo de parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos de cada URH fueron obtenidos mediante las

herramientas de procesamiento del terreno de HEC-HMS, empleando el mismo Modelo Digital de Elevaciones y sistema de referencia espacial en los siete escenarios. Entre los parámetros calculados se consideraron el área, la elevación media, la pendiente media de la subcuenca y la longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga.

La variable Longest Flowpath Length representa la longitud comprendida entre el punto de salida de la subcuenca y el punto hidráulicamente más alejado ubicado aguas arriba. Por su parte, la variable Basin Slope representa la pendiente media de toda la superficie de la subcuenca, calculada por HEC-HMS a partir de las celdas del modelo de elevaciones (U.S. Army Corps of Engineers, 2026).

El tiempo de concentración de cada URH fue estimado mediante la ecuación de Bransby-Williams, cuya formulación considera el área tributaria, la longitud de flujo y una pendiente representativa:

$$T_C = \frac{58.5L}{A^{0.1}{S_b}^{0.2}} \qquad \text{(Ec. 26)}$$

Donde:

T_C es el tiempo de concentración, en minutos.

L es la variable *Longest Flowpath Length*, en kilómetros

A es el área tributaria de la URH, en kilómetros cuadrados.

S_b es es la variable Basin Slope, en m/km.

La ecuación fue seleccionada por su aplicación en cuencas rurales y por incorporar variables morfométricas sensibles al cambio de escala espacial, como el área, la longitud hidráulica y la pendiente. Asimismo, su utilización ha sido reportada en investigaciones orientadas a evaluar la influencia de la discretización espacial en modelos HEC-HMS (Barbosa et al., 2019).

En su formulación convencional, la ecuación puede emplear la pendiente equivalente del cauce principal. En esta investigación se utilizó operacionalmente la variable Basin Slope calculada por HEC-HMS como pendiente representativa de cada URH. Este mismo criterio se mantuvo en todas las unidades y escenarios, permitiendo conservar una configuración morfométrica homogénea para el análisis comparativo.

3.7.3. Estimación del Número de Curva

Como insumo inicial se empleó una capa cartográfica de Número de Curva descargada de Geo GPS Perú. Esta capa contenía intervalos de CN asociados a las características superficiales del territorio. Para representar cada intervalo mediante un valor único, se adoptó su valor medio redondeado: 61 para el intervalo 55–66, 70 para 66–74, 78 para 74–81, 86 para 81–90 y 95 para 90–100 (Geo GPS Perú, 2019).

La capa reclasificada fue intersectada con las áreas tributarias correspondientes a cada escenario de discretización. El Número de Curva compuesto de cada URH se calculó mediante el promedio ponderado por área:

$$CN_{compuesto,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_{ij} CN_i}{\sum_{i=1}^{n} A_{ij}} \qquad \text{(Ec. 27)}$$

Donde:

CN_i representa el Número de Curva de la clase i.

A_{ij} es el área ocupada por dicha clase dentro de la URH j

X es el coeficiente de ponderación adimensional.

n corresponde al número de clases presentes en la unidad espacial.

3.7.4. Generación de escenarios de discretización espacial

Para efectos operativos, las unidades espaciales resultantes de la delimitación fueron denominadas URHs. Dentro de HEC-HMS, cada URH fue implementada como un elemento

Subbasin, por lo que el número de URHs de cada escenario fue equivalente al número de elementos Subbasin incorporados en su correspondiente modelo de cuenca.

Los siete escenarios de discretización espacial fueron generados mediante las herramientas GIS integradas en HEC-HMS v.4.13.0. En todos los casos se utilizó el mismo modelo digital de elevaciones y se mantuvo fijo el punto de salida correspondiente a la estación hidrométrica Sayán, de modo que la extensión total de la cuenca y su condición de descarga fueran comparables entre escenarios.

A partir del ráster de acumulación de flujo se aplicó la herramienta Identify Streams. En esta herramienta se modificó el parámetro Area to Define Streams, expresado en km², el cual representa el umbral de área aportante acumulada a partir del cual una celda del DEM es identificada como parte de un cauce. Este parámetro no corresponde necesariamente al área mínima final de las URHs delimitadas, sino que controla el inicio y la densidad de la red de drenaje generada.

Los umbrales utilizados fueron 500 km² para el escenario de 3 URHs, 200 km² para 5 URHs, 150 km² para 9 URHs, 85 km² para 17 URHs, 55 km² para 35 URHs, 25 km² para 65 URHs y 10 km² para 153 URHs. La reducción progresiva del umbral incrementó la densidad de la red de drenaje y el número de confluencias, generando una mayor cantidad de unidades espaciales.

Para cada umbral se generó la red de drenaje correspondiente y posteriormente se aplicó la delimitación de elementos de cuenca. Las áreas tributarias resultantes fueron representadas como elementos de subcuenca y consideradas como URHs dentro de la investigación. Asimismo, se generaron los tramos de cauce, las uniones y un único elemento de salida en Sayán.

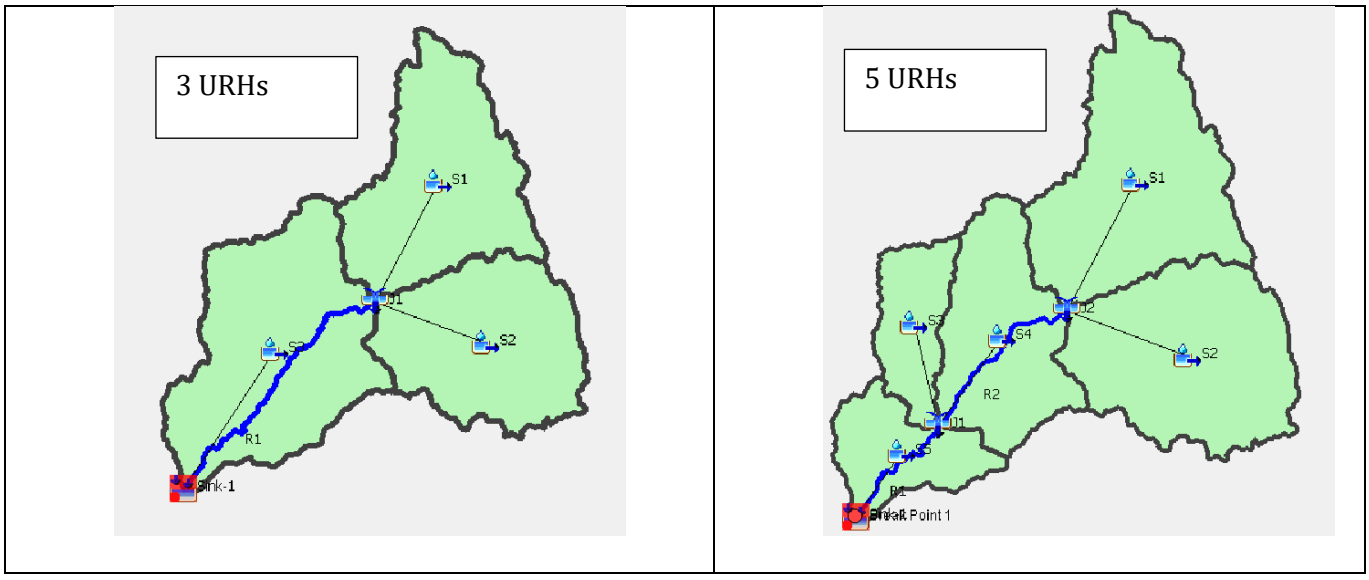
Como control topológico, se comprobó que las URHs y los tramos de cauce mantuvieran

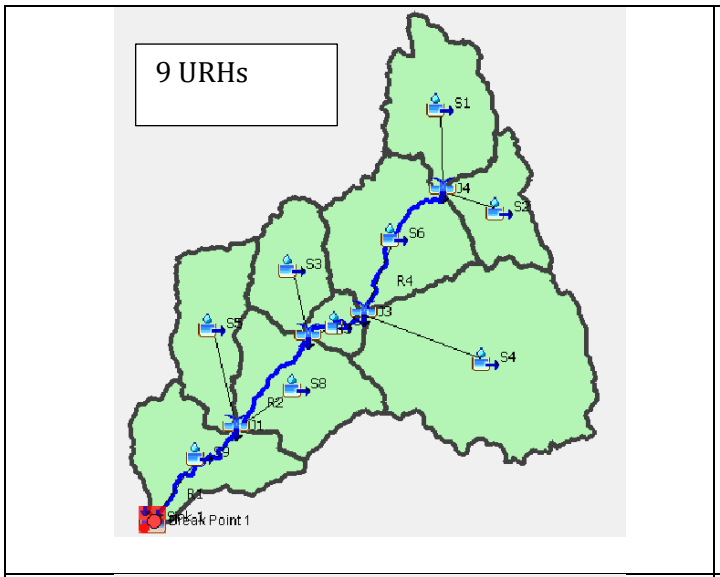
continuidad hidráulica y una conexión aguas abajo hacia el mismo punto de salida. De esta manera, los siete modelos conservaron la misma extensión territorial y metodología de procesamiento, diferenciándose únicamente por el umbral utilizado para definir la red de drenaje y, consecuentemente, por el número de URHs generado.

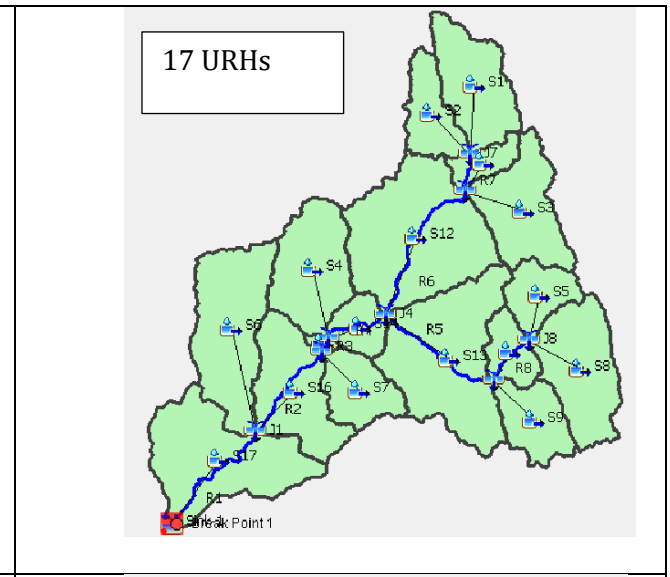
Los escenarios resultantes estuvieron conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs. Cada configuración representó un nivel diferente de detalle espacial y permitió evaluar la influencia de la discretización en la generación de caudales naturales diarios simulados, ver Figura 9.

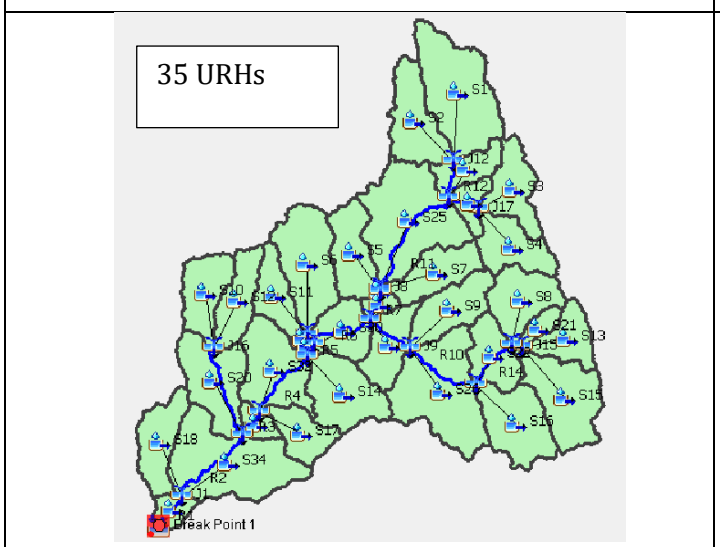
Figura 9

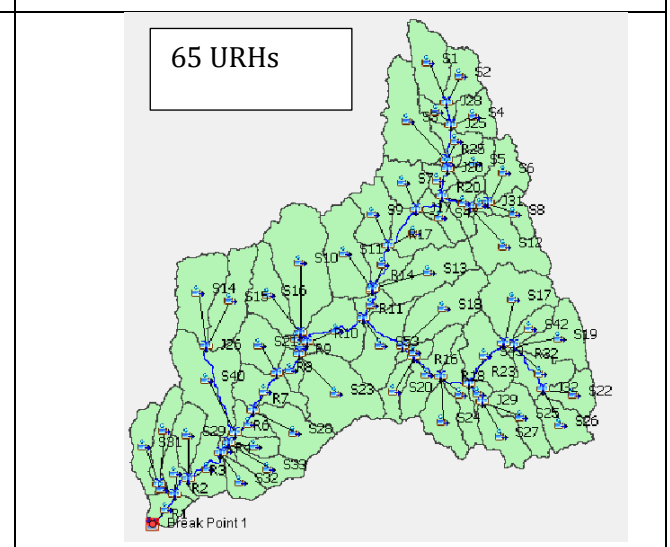
Discretización espacial por escenarios de URHs

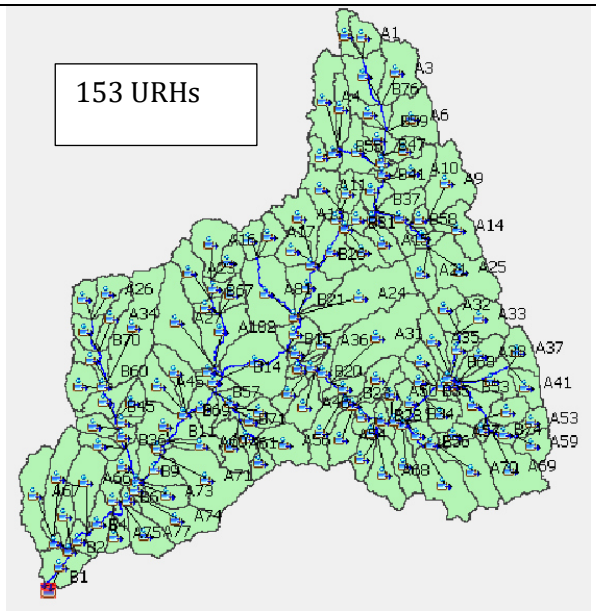



9 URHs
Break Point 1


17 URHs
Break Point 1


35 URHs
Break Point 1


65 URHs
Break Point 1



Nota. Los escenarios fueron generados con el mismo DEM y punto de salida, variando únicamente el parámetro Area to Define Streams. La reducción del umbral incorporó cauces tributarios adicionales y subdividió progresivamente las áreas de aporte, produciendo una estructura espacial jerárquicamente anidada.

Tabla 6

Características generales de los escenarios de discretización espacial

Escenario	Umbral de área aportante acumulada (km²)	Área mínima (km^2)	Área máxima (km^2)	Área promedio (km^2)
3 URHs	500	817.41	1,137.18	947.07
5 URHs	200	260.92	886.63	568.28
9 URHs	150	64.14	817.41	315.69
17 URHs	85	9.59	378.38	167.13
35 URHs	55	0.07	199.74	81.18
65 URHs	25	0.07	132.33	43.71
153 URHs	10	0.02	83.37	18.57

3.8. Automatización y organización de datos mediante Python

3.8.1. Procesamiento de datos hidrometeorológicos

Python fue utilizado como herramienta de apoyo para la organización, depuración, procesamiento y sistematización de los datos empleados en la investigación. Su aplicación permitió automatizar procedimientos repetitivos relacionados con la limpieza de series hidrometeorológicas, el cálculo de parámetros, la generación de tablas de entrada y la organización de resultados provenientes de los escenarios de modelamiento.

En el procesamiento de datos hidrometeorológicos, Python permitió estructurar las series de precipitación y caudal, verificar la continuidad temporal de los registros, identificar valores faltantes y organizar los datos en formatos compatibles con las etapas posteriores del análisis.

3.8.2. Procesamiento de información geoespacial

En el procesamiento espacial, Python fue empleado como apoyo para sistematizar cálculos derivados de la información geoespacial, organizar atributos asociados a las URHs y consolidar tablas de parámetros físicos e hidrológicos. De esta manera, se favoreció la trazabilidad del procedimiento y se redujo la posibilidad de errores asociados al manejo manual de información.

La automatización de estos procedimientos permitió mantener una estructura uniforme en el tratamiento de los datos correspondientes a los siete escenarios de discretización espacial. Esto resultó importante para asegurar que las comparaciones entre escenarios se realizaran bajo criterios homogéneos.

3.8.3. Organización y sistematización de resultados

Python también fue utilizado para organizar los resultados generados por las simulaciones hidrológicas. A partir de las salidas del modelo, se sistematizaron las series de caudal, se calcularon volúmenes acumulados y se prepararon tablas comparativas entre

escenarios.

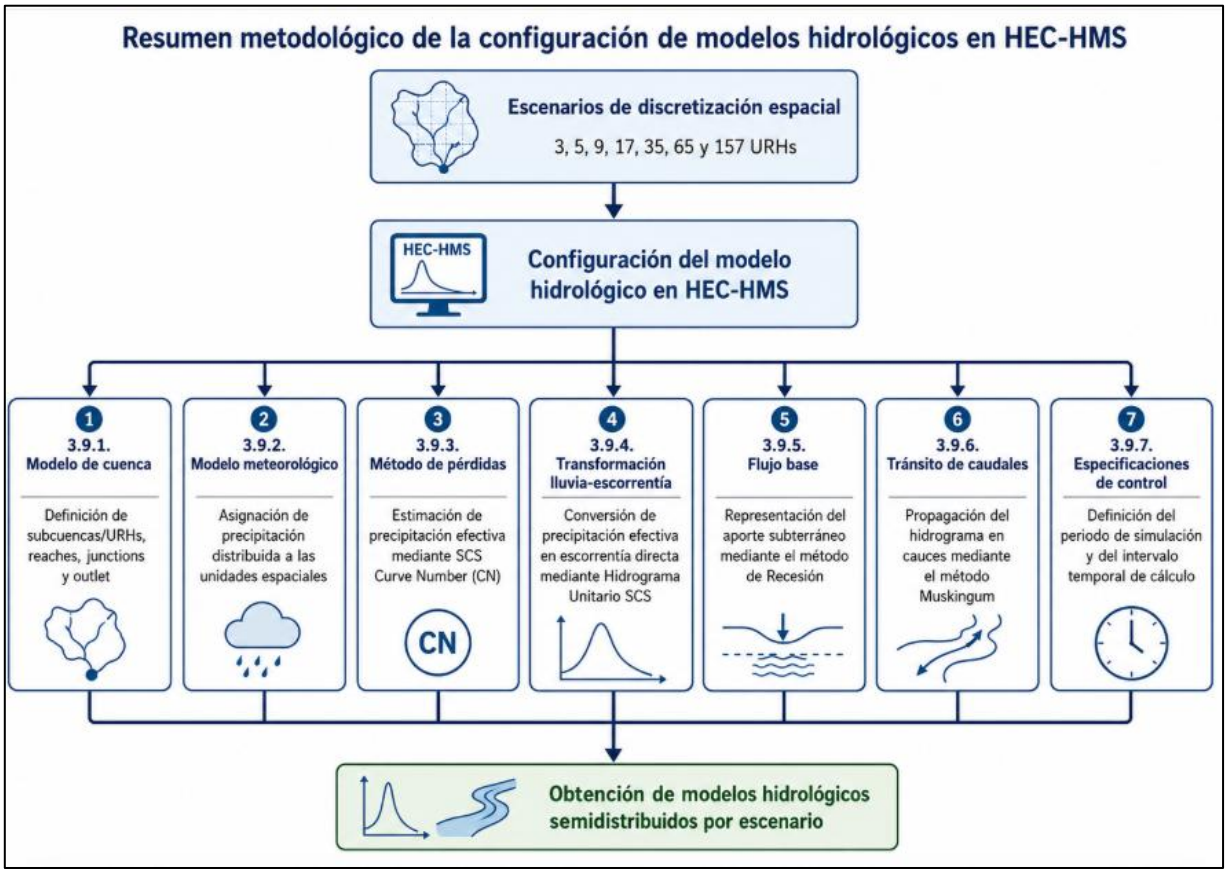
La automatización mediante Python no constituyó un componente independiente del modelo hidrológico, sino una herramienta auxiliar para fortalecer la organización, reproducibilidad, trazabilidad y sistematización del procesamiento de los datos.

3.9. Configuración del modelo hidrológico en HEC-HMS

Como se observa en la Figura 10, la configuración del modelo hidrológico comprendió la definición del modelo de cuenca, el modelo meteorológico, el método de pérdidas, la transformación lluvia-escorrentía, el flujo base, el tránsito de caudales y las especificaciones de control. En todos los escenarios se mantuvieron constantes los métodos hidrológicos empleados: SCS Curve Number para la estimación de pérdidas, Hidrograma Unitario SCS para la transformación lluvia-escorrentía, Recession para la representación del flujo base y Muskingum para el tránsito de caudales. De esta manera, se obtuvieron modelos hidrológicos semidistribuidos comparables entre sí, diferenciados principalmente por el número de URHs considerado en cada escenario. Las simulaciones se desarrollaron para los años 2016, 2017 y 2018, considerando en cada caso el periodo comprendido entre enero y mayo.

Figura 10

Resumen metodológico de la configuración de los modelos hidrológicos semidistribuidos en HEC-HMS



Nota. Elaboración propia. La figura resume la secuencia metodológica empleada para configurar los modelos hidrológicos en HEC-HMS v.4.13.0, considerando los escenarios de discretización espacial de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs.

En la Tabla 7 se presenta el resumen de los componentes y métodos empleados en la configuración de los modelos hidrológicos en HEC-HMS para los siete escenarios de discretización espacial.

Tabla 7

Métodos empleados en la configuración de HEC-HMS

Componente	Modelo
Pérdidas	SCS Curve Number
Transformación	SCS Unit Hydrograph
Flujo base	Recession
Tránsito de caudales	Muskingum
Distribución de precipitación	IDW
Modelo	Semidistribuido

3.9.1. Modelo de cuenca

El modelamiento hidrológico se desarrolló mediante HEC-HMS v.4.13.0, utilizando una estructura semidistribuida basada en los siete escenarios de discretización espacial. Para cada escenario se construyó un modelo de cuenca independiente en el cual cada URH fue representada mediante un elemento Subbasin. Estos elementos generaron los hidrogramas de escorrentía a partir de la precipitación asignada y de los métodos de pérdidas, transformación y flujo base. Los elementos Reach representaron el tránsito por los cauces, los elementos Junction representaron las confluencias y el elemento Sink correspondió al punto de salida común ubicado en Sayán.

La configuración del modelo de cuenca consideró la asignación de parámetros físicos e hidrológicos a cada unidad espacial. Entre estos parámetros se incluyeron el área de aporte, el número de curva, el tiempo de retardo, parámetros de flujo base, parámetros de tránsito y características asociadas a la red de drenaje. Estos valores fueron determinados a partir del procesamiento geoespacial, la información de uso y cobertura del suelo, el modelo digital de elevaciones y los criterios hidrológicos adoptados en el estudio.

3.9.2. Modelo meteorológico

El modelo meteorológico fue configurado a partir de las series de precipitación procesadas y distribuidas espacialmente mediante el método de distancia inversa ponderada. Esta información permitió representar la entrada de lluvia en cada escenario de modelamiento, considerando la influencia relativa de las estaciones pluviométricas sobre las unidades espaciales de la cuenca.

La configuración meteorológica permitió incorporar la variabilidad temporal y espacial de la precipitación dentro del modelo HEC-HMS. De esta forma, cada escenario de discretización recibió información de precipitación coherente con la ubicación de sus unidades espaciales y con la distribución de las estaciones disponibles.

3.9.3. Método de pérdidas

Para Los valores de Número de Curva ajustados fueron incorporados en el método de pérdidas SCS-CN de cada elemento Subbasin. La retención potencial máxima fue calculada a partir del CN ajustado mediante la expresión $S=(25400/CN)-254$, mientras que la abstracción inicial se determinó como $Ia=0.2S$. En consecuencia, cada valor de abstracción inicial fue calculado empleando el CN definitivo asignado a la correspondiente URH.

No se efectuaron ajustes individuales del CN durante la configuración de los diferentes escenarios. Por tanto, las variaciones entre los resultados no proceden de factores de corrección diferentes, sino principalmente del cambio en el nivel de discretización espacial.

El porcentaje de área directamente impermeable se estableció en 0 %, debido a que este componente no fue representado separadamente y su influencia superficial se encontraba comprendida en los valores compuestos de CN.

3.9.4. Transformación lluvia-escorrentía

El tiempo de respuesta de cada URH se estimó inicialmente mediante la ecuación de

Bransby-Williams, empleando el área tributaria, la longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga y la pendiente media de la subcuenca obtenidas de HEC-HMS. Los tiempos de concentración fueron calculados individualmente para todas las URHs de los siete escenarios, sin utilizar un valor general para toda la cuenca.

Los valores obtenidos fueron posteriormente utilizados para calcular el tiempo de retardo requerido por el Hidrograma Unitario del SCS. El mismo procedimiento y las mismas conversiones de unidades fueron aplicados en todos los escenarios de discretización.

ara representar la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa se empleó el método del hidrograma unitario del SCS. Para cada unidad espacial, el tiempo de retardo, se calculó mediante la relación del 60 % del tiempo de concentración, utilizando el valor sin redondear. Posteriormente, los resultados fueron convertidos de horas a minutos para su ingreso en el campo Lag Time de HEC-HMS.

En las unidades de respuesta hidrológica se seleccionó el tipo de hidrograma unitario estándar, denominado Standard, con un factor de pico PRF igual a 484. Esta configuración define la forma relativa y la distribución temporal del hidrograma unitario, y corresponde a la opción estándar disponible en HEC-HMS

3.9.5. Flujo base

La contribución del flujo base se representó mediante el método Recession de HEC-HMS, dentro de una configuración de simulación continua. Para todas las unidades espaciales se estableció un caudal inicial específico de 0.015 $m^3/s/km^2$. Este valor se adoptó como una condición inicial representativa del aporte subterráneo y de los almacenamientos subsuperficiales de la cuenca durante el inicio del periodo de simulación. Su selección se sustenta en que el flujo base constituye una fracción relativamente estable del caudal total durante los periodos de menor precipitación y permite evitar una condición inicial nula, la cual

podría generar una subestimación artificial del caudal al comienzo de la simulación. Además, el valor específico permite expresar la condición inicial en función del área de cada unidad espacial, manteniendo la consistencia entre URHs de diferente tamaño.

La constante de recesión se fijó en 0.98, mientras que el parámetro Ratio to Peak se estableció en 0.20. La constante de recesión controla la disminución progresiva del flujo base entre intervalos sucesivos, mientras que el parámetro Ratio to Peak establece el criterio empleado por el modelo para relacionar el flujo base con el caudal máximo generado durante la simulación.

Estos parámetros no fueron obtenidos mediante una calibración hidrométrica estricta, debido a que los registros de la estación Sayán pueden encontrarse influenciados por la regulación hidráulica existente aguas arriba. Por ello, los valores fueron adoptados como una configuración homogénea y se mantuvieron constantes en todas las URHs, escenarios y periodos simulados. Esta decisión permitió evitar que modificaciones en los parámetros de flujo base introdujeran una fuente adicional de variación en la comparación de los escenarios de discretización espacial.

3.9.6. Tránsito de caudales

El tránsito de caudales a través de la red de drenaje se representó mediante el método Muskingum. Para cada tramo de cauce se estimó inicialmente un tiempo característico mediante la ecuación de Kirpich:

$$T_{Kirpich} = 0.0195L^{0.77}S^{-0.385} \qquad \text{(Ec. 28)}$$

Donde:

$T_{Kirpich}$ es el tiempo calculado en horas.

L es la longitud del tramo en metros.

S es la pendiente longitudinal expresada en m/m.

Posteriormente, se adoptó operacionalmente la relación $K = 0.60 \times T_{Kirpich}$ .Este procedimiento fue aplicado de manera uniforme a todos los tramos de los siete escenarios de discretización. En consecuencia, los valores de (K) variaron entre los tramos de acuerdo con sus características geométricas, mientras que el procedimiento utilizado para obtenerlos permaneció constante.

El coeficiente de ponderación (X) se fijó en 0.50 para todos los tramos. Este valor no fue obtenido mediante calibración, sino que fue adoptado como criterio homogéneo de modelación, con el propósito de representar un tránsito predominantemente traslacional y evitar que la variación de (X) introdujera un factor adicional en la comparación entre escenarios.

La condición inicial se configuró mediante la opción Discharge = Inflow, que establece que el caudal de salida inicial es igual al primer caudal de entrada al tramo. Asimismo, se empleó un subtramo para cada elemento Reach. El valor de (X), la condición inicial y el número de subtramos se mantuvieron constantes en todos los escenarios y periodos simulados.

3.9.7. Especificaciones de control

Las simulaciones se ejecutaron de manera independiente para los periodos comprendidos entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016, 2017 y 2018. En las especificaciones de control de HEC-HMS se estableció un intervalo computacional de un minuto, lo que permitió representar la evolución temporal de los procesos hidrológicos con una resolución subdiaria. Posteriormente, los resultados se integraron a escala diaria para hacerlos comparables con la resolución temporal de las series de precipitación utilizadas y con el objetivo de comparar los caudales naturales diarios simulados.

Las mismas fechas de inicio, término e intervalo computacional fueron utilizadas en los

siete escenarios de discretización, garantizando que todos fueran evaluados bajo una configuración temporal homogénea.

Los resultados fueron obtenidos inicialmente a escala subdiaria y posteriormente agregados a escala diaria. En consecuencia, los caudales reportados corresponden a valores diarios integrados a partir de la simulación con intervalo de un minuto, y no a caudales máximos instantáneos.

3.10. Evaluación comparativa y análisis estadístico de los escenarios de discretización espacial

3.10.1. Contraste hidrométrico complementario con la estación Sayán

La evaluación de los resultados simulados se orientó al análisis comparativo de los escenarios de discretización espacial, considerando que el objetivo principal de la investigación fue determinar si el incremento del número de URHs generaba variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados. Debido a que los registros de la estación de aforo Sayán pueden estar influenciados por regulación hidráulica aguas arriba, dicha serie fue utilizada como referencia hidrométrica disponible para contraste complementario, mas no como una serie natural no regulada para calibración o validación estricta del modelo.

Los criterios principales de evaluación fueron los hidrogramas simulados, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, coeficientes de Pearson y Spearman, error absoluto medio, error absoluto medio relativo, error cuadrático medio y sesgo medio. Estos indicadores permitieron evaluar la variación de la respuesta hidrológica simulada entre escenarios de discretización espacial y analizar la estabilidad de los resultados respecto al escenario de mayor discretización espacial.

De esta manera, el análisis comparativo y estadístico permitió evaluar si el incremento del número de URHs generaba variaciones relevantes en los caudales naturales diarios

simulados. Asimismo, este análisis permitió identificar si una mayor discretización espacial modificaba de manera sustancial la respuesta hidrológica simulada o si, por el contrario, los resultados tendían a estabilizarse en los escenarios de mayor detalle espacial.

3.10.2. Métricas de distancia respecto al escenario de 153 URHs

La comparación entre escenarios se realizó mediante métricas de distancia y similitud respecto al escenario de 153 URHs, considerado como el escenario de mayor discretización espacial. Para ello, se calcularon el error absoluto medio, el error absoluto medio relativo, el error cuadrático medio, el sesgo medio y los coeficientes de Pearson y Spearman entre cada escenario y el escenario de 153 URHs.

Estos indicadores facilitaron la comparación entre los diferentes escenarios de discretización espacial y permitieron identificar si una mayor subdivisión de la cuenca producía cambios relevantes en los resultados simulados. De esta manera, la evaluación se centró en la estabilidad de la respuesta hidrológica frente al incremento del número de URHs, manteniendo un criterio homogéneo de comparación para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs.

Para efectos del análisis comparativo, el escenario de 153 URHs fue definido como la única referencia interna, debido a que representa el mayor nivel de discretización espacial evaluado en la investigación. En consecuencia, los resultados correspondientes a los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35 y 65 URHs fueron comparados directamente con los obtenidos en el escenario de 153 URHs para cada uno de los periodos 2016, 2017 y 2018.

3.10.3. Coherencia hidrológica de los hidrogramas

De manera complementaria, se revisó la coherencia hidrológica de los hidrogramas simulados, considerando aspectos como la forma general del hidrograma, la continuidad de la serie de caudales, la respuesta frente a los periodos de precipitación y la consistencia de los volúmenes generados. Esta revisión permitió verificar que los resultados obtenidos fueran

compatibles con el comportamiento hidrológico esperado de la cuenca.

Los parámetros hidrológicos se definieron procurando mantener coherencia física con las características de la cuenca y con los métodos seleccionados en HEC-HMS. Los ajustes globales aplicados se mantuvieron de manera homogénea en los siete escenarios y no fueron determinados mediante optimización frente a la estación de aforo Sayán. En consecuencia, la serie de Sayán no se utilizó para calibración o validación estricta del modelo, sino exclusivamente como referencia hidrométrica complementaria y contextual.

Por ello, la interpretación de los resultados se centró en determinar si los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs presentaban diferencias relevantes en los caudales naturales diarios simulados y en los volúmenes bajo los hidrogramas. Bajo este enfoque, la evaluación permitió analizar la influencia del nivel de discretización espacial en la respuesta hidrológica simulada, considerando como criterios principales el análisis comparativo entre escenarios, las métricas de distancia, el sesgo medio, los coeficientes de correlación y la coherencia hidrológica de los hidrogramas.

3.10.4. Criterio operativo de estabilización

Para evitar una interpretación subjetiva de la estabilización de los resultados, se estableció un criterio operativo basado en la evaluación conjunta de la magnitud, el volumen acumulado, el caudal máximo y la similitud temporal de los hidrogramas.

Para fines de la presente investigación, un escenario fue considerado compatible con una respuesta hidrológica estabilizada cuando cumplió simultáneamente, en los tres periodos evaluados, las siguientes condiciones respecto al escenario de 153 URHs:

1) Error absoluto medio relativo (MRAE) menor o igual a 15 %.
2) Diferencia relativa absoluta del caudal máximo diario simulado menor o igual a 15 %.

3) Diferencia relativa absoluta del volumen total menor o igual al 15 %.
4) Coeficiente de correlación de Pearson mayor o igual a 0.90.
5) Coeficiente de correlación de Spearman mayor o igual a 0.90.

El límite de 15 % fue adoptado como una tolerancia operativa interna para clasificar como reducidas las diferencias de magnitud entre escenarios. Este valor no representa un estándar universal de exactitud ni un criterio de calibración hidrológica. Del mismo modo, el límite de 0.90 se utilizó para exigir una asociación temporal muy alta entre los hidrogramas comparados.

La estabilización no se declaró a partir de una sola métrica o de un único periodo. El cumplimiento debía producirse conjuntamente en 2016, 2017 y 2018. Además, para identificar el inicio de una zona de estabilización, el cumplimiento debía mantenerse en los escenarios posteriores de mayor discretización. De esta manera, una coincidencia aislada seguida por nuevas diferencias no fue considerada evidencia suficiente de estabilización.

El escenario de 153 URHs fue utilizado únicamente como referencia interna de mayor detalle espacial. En consecuencia, el cumplimiento de estos criterios expresa cercanía entre configuraciones del modelo y no exactitud frente al comportamiento hidrológico real de la cuenca.

Los valores de MAE, RMSE y sesgo medio se mantuvieron como indicadores diagnósticos complementarios, pero no se les asignaron umbrales de estabilización debido a que sus magnitudes dependen directamente del orden de los caudales de cada periodo.

La Tabla 8 resume los cinco criterios operativos utilizados para identificar la estabilización de la respuesta hidrológica simulada.

Tabla 8

Criterios operativos para evaluar la estabilización de la respuesta hidrológica simulada

Componente evaluado	Indicador	Condición de estabilidad	Aplicación
Diferencia media relativa	MRAE	≤ 15 %	Debe cumplirse en 2016, 2017 y 2018
Respuesta acumulada	Diferencia relativa del volumen	≤ 15 %	Debe cumplirse en los tres periodos
Respuesta máxima	Diferencia relativa del caudal máximo diario	≤ 15 %	Debe cumplirse en los tres periodos
Similitud lineal	Pearson	≥ 0.90	Debe cumplirse en los tres periodos
Similitud monotónica	Spearman	≥ 0.90	Debe cumplirse en los tres periodos
Persistencia	Cumplimiento en escenarios posteriores	Obligatorio	Evita declarar estabilidad por una coincidencia aislada

Nota. El 15 % y el 0.90 son tolerancias internas para evaluar la estabilización frente a 153 URHs, no estándares de calibración. Las fuentes de Legates y McCabe (1999), Manikanta y Umamahesh (2023), Mioriasi et al. (2015), Schober et al. (2018), EPA (s.f.) y Atkins et al. (2025) aportan antecedentes al valor de MRAE ≤ 15 %.

3.11. Análisis comparativo de los escenarios de discretización espacial

3.11.1. Comparación de hidrogramas

El análisis comparativo se realizó a partir de los resultados generados por los siete escenarios de discretización espacial. Para cada escenario se obtuvieron caudales naturales diarios simulados, hidrogramas de salida y volúmenes acumulados durante el periodo de análisis. Los resultados de los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35 y 65 URHs fueron comparados exclusivamente con el escenario de 153 URHs, utilizado como referencia interna de mayor discretización espacial.

La comparación de hidrogramas permitió evaluar diferencias en la forma general de la respuesta hidrológica simulada, la magnitud de los caudales, la continuidad de las series y el comportamiento temporal de los resultados. Este análisis permitió identificar si el incremento del número de URHs modificaba de manera apreciable la respuesta hidrológica del modelo.

3.11.2. Comparación de volúmenes

La comparación de volúmenes se realizó mediante el cálculo del volumen total bajo el hidrograma para cada escenario de discretización espacial. Los volúmenes obtenidos en los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35 y 65 URHs fueron comparados directamente con el volumen correspondiente al escenario de 153 URHs para cada periodo de simulación.

El criterio principal de evaluación fue la variación de los resultados simulados entre escenarios de discretización espacial. Esta comparación permitió determinar si una mayor discretización espacial generaba cambios relevantes en la respuesta hidrológica o si, por el contrario, incrementaba la complejidad del modelo sin producir diferencias sustanciales respecto a los escenarios de mayor detalle.

3.11.3. Análisis de sensibilidad y estabilización de resultados frente al número de URHs

El análisis de sensibilidad al número de URHs se orientó a determinar cómo variaban los resultados simulados de cada nivel de discretización respecto del escenario de 153 URHs. Para ello, los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35 y 65 URHs fueron evaluados mediante el MRAE, la diferencia relativa absoluta del caudal máximo diario simulado, la diferencia relativa absoluta del volumen total y los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, utilizando en todos los casos el escenario de 153 URHs como referencia interna.

La estabilización fue identificada en el primer escenario que cumplió simultáneamente los cinco criterios establecidos durante los periodos 2016, 2017 y 2018, siempre que los

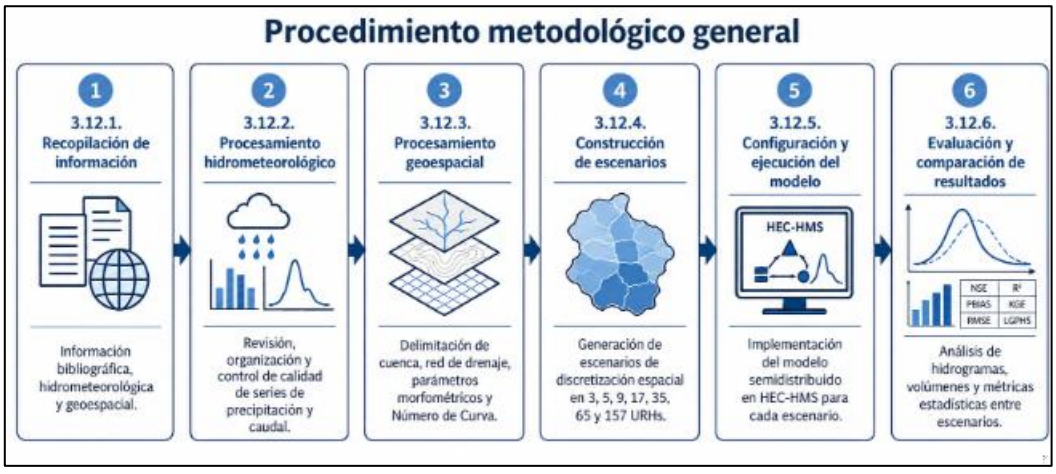
escenarios posteriores de mayor discretización también mantuvieran su cumplimiento respecto de la misma referencia de 153 URHs. Esta condición de permanencia no implicó la comparación entre escenarios consecutivos, sino la evaluación independiente de cada configuración respecto de una referencia común.

3.12. Procedimiento metodológico general

El procedimiento metodológico seguido en la investigación se estructuró en seis etapas principales, orientadas a organizar el proceso de recopilación, procesamiento, configuración, simulación y evaluación de los modelos hidrológicos. Estas etapas permitieron representar de manera ordenada el desarrollo del estudio, desde la obtención de información hidrometeorológica y geoespacial hasta la comparación de los resultados simulados para los diferentes escenarios de discretización espacial. La Figura 11 resume el procedimiento metodológico general aplicado en la investigación.

Figura 11

Procedimiento metodológico general de la investigación



Nota. Elaboración propia.

El procedimiento metodológico inició con la recopilación de información, seguida del procesamiento hidrometeorológico y geoespacial. Posteriormente, se construyeron los

escenarios de discretización espacial y se configuraron los modelos hidrológicos en HEC-HMS. Finalmente, se ejecutaron las simulaciones y se evaluaron los resultados mediante la comparación de hidrogramas, volúmenes y métricas estadísticas entre escenarios.

3.12.1. Recopilación de información

El procedimiento metodológico se desarrolló en fases secuenciales e integradas. En la primera fase se recopiló y revisó la información bibliográfica, hidrometeorológica y geoespacial necesaria para sustentar el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura. Esta etapa permitió definir los criterios conceptuales y técnicos que orientaron la selección de métodos, datos y herramientas de análisis.

3.12.2. Procesamiento hidrometeorológico

En la segunda fase se procesaron los datos hidrometeorológicos de precipitación y caudal. Las series fueron organizadas, revisadas y evaluadas para identificar inconsistencias, valores faltantes y registros atípicos. Posteriormente, la precipitación fue preparada para su incorporación en el modelo meteorológico de HEC-HMS, mientras que los caudales registrados en la estación de aforo Sayán fueron procesados como referencia hidrométrica disponible para contraste complementario de los resultados simulados.

3.12.3. Procesamiento geoespacial

En la tercera fase se desarrolló el procesamiento geoespacial de la cuenca. A partir del modelo digital de elevaciones se delimitó la cuenca, se generó la red de drenaje y se calcularon parámetros morfométricos. Asimismo, se procesó la información de uso y cobertura del suelo para estimar valores de número de curva en las unidades espaciales definidas.

3.12.4. Construcción de escenarios

En la cuarta fase se construyeron los siete escenarios de discretización espacial en URHs. Cada escenario fue caracterizado mediante parámetros físicos e hidrológicos, con el propósito

de generar modelos comparables en HEC-HMS. Esta etapa permitió representar la cuenca bajo diferentes niveles de detalle espacial.

3.12.5. Configuración y ejecución del modelo

En la quinta fase se configuraron y ejecutaron los modelos hidrológicos en HEC-HMS v.4.13.0. Para cada escenario se definieron el modelo de cuenca, el modelo meteorológico, las especificaciones de control y los métodos hidrológicos correspondientes a pérdidas, transformación lluvia-escorrentía, flujo base y tránsito de caudales.

3.12.6. Evaluación y comparación de resultados

En la sexta fase se evaluaron los resultados simulados mediante un análisis comparativo y estadístico entre escenarios de discretización espacial. El análisis se centró en los hidrogramas simulados, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo hidrogramas, métricas de distancia, métricas de similitud y revisión de coherencia hidrológica de los hidrogramas simulados.

Finalmente, se compararon los resultados de los siete escenarios de discretización espacial. Esta comparación permitió evaluar la influencia del número de URHs sobre la generación de caudales naturales diarios simulados y determinar si una mayor discretización espacial generaba mejoras relevantes en la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada del modelo.

La correspondencia entre el problema de investigación, los objetivos, la hipótesis, los procedimientos desarrollados, los resultados obtenidos y las conclusiones formuladas se presenta en la matriz de alineamiento metodológico incluida en el Anexo G. Esta matriz permitió verificar que cada objetivo específico contara con un procedimiento identificable, evidencia en los resultados y una conclusión correspondiente.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos a partir de la simulación hidrológica de la cuenca del río Huaura bajo siete escenarios de discretización espacial, conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 Unidades de Respuesta Hidrológica. El análisis se orientó a evaluar la influencia del nivel de discretización espacial sobre la generación de caudales naturales diarios simulados, considerando hidrogramas, caudales máximos, estadísticos descriptivos, volúmenes bajo los hidrogramas y métricas de comparación entre series hidrológicas.

La estación de aforo Sayán fue considerada como referencia hidrométrica disponible para contrastar de manera complementaria la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales simulados. Sin embargo, debido a la posible influencia de infraestructura de regulación hidráulica ubicada aguas arriba, la comparación con Sayán no fue interpretada como un proceso de calibración o validación estricta del modelo. En consecuencia, el análisis principal se centró en la comparación entre escenarios de discretización espacial, utilizando el escenario de 153 URHs como referencia interna de mayor detalle espacial para evaluar la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada.

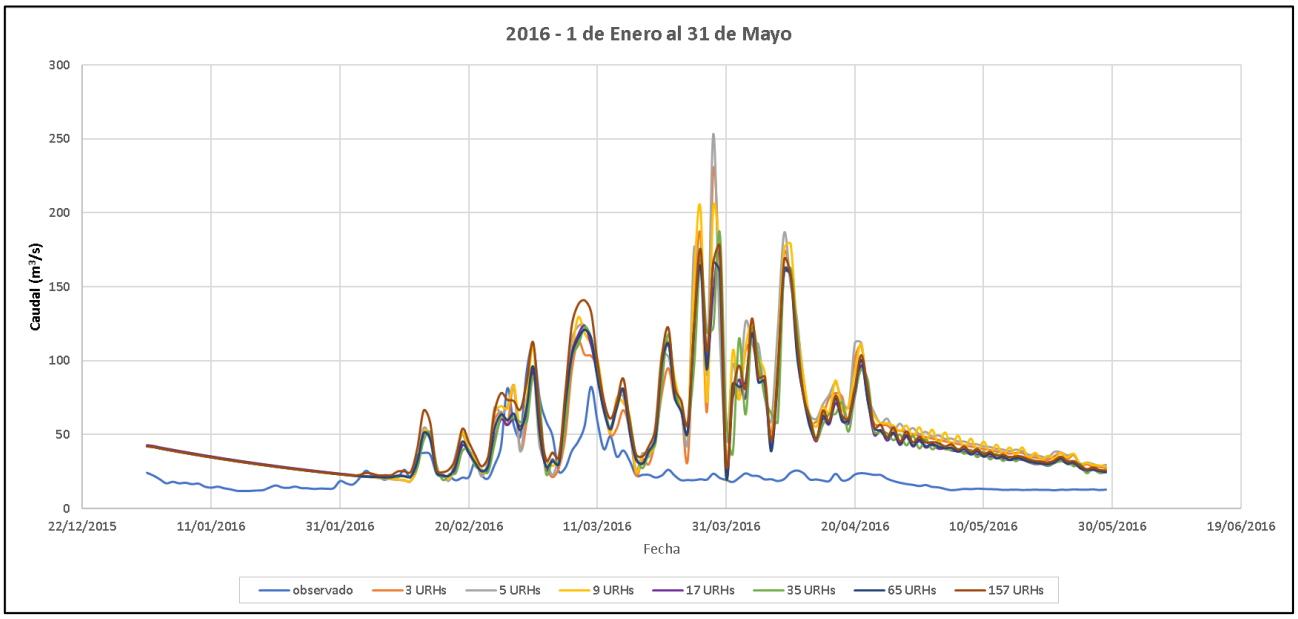
4.1. Comparación de hidrogramas observados y simulados

La comparación de hidrogramas permitió analizar visualmente la respuesta hidrológica obtenida en cada escenario de discretización espacial. Para los periodos evaluados, se representaron conjuntamente los caudales registrados en la estación de aforo Sayán y los caudales naturales diarios simulados para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs. Esta comparación permitió observar diferencias en la magnitud de los caudales, la ocurrencia de picos, la forma general de los hidrogramas y la respuesta temporal de los escenarios simulados.

Las Figura 12, Figura 13 y Figura 14 presentan la comparación de los hidrogramas correspondientes a 2016, 2017 y 2018, respectivamente.

Figura 12

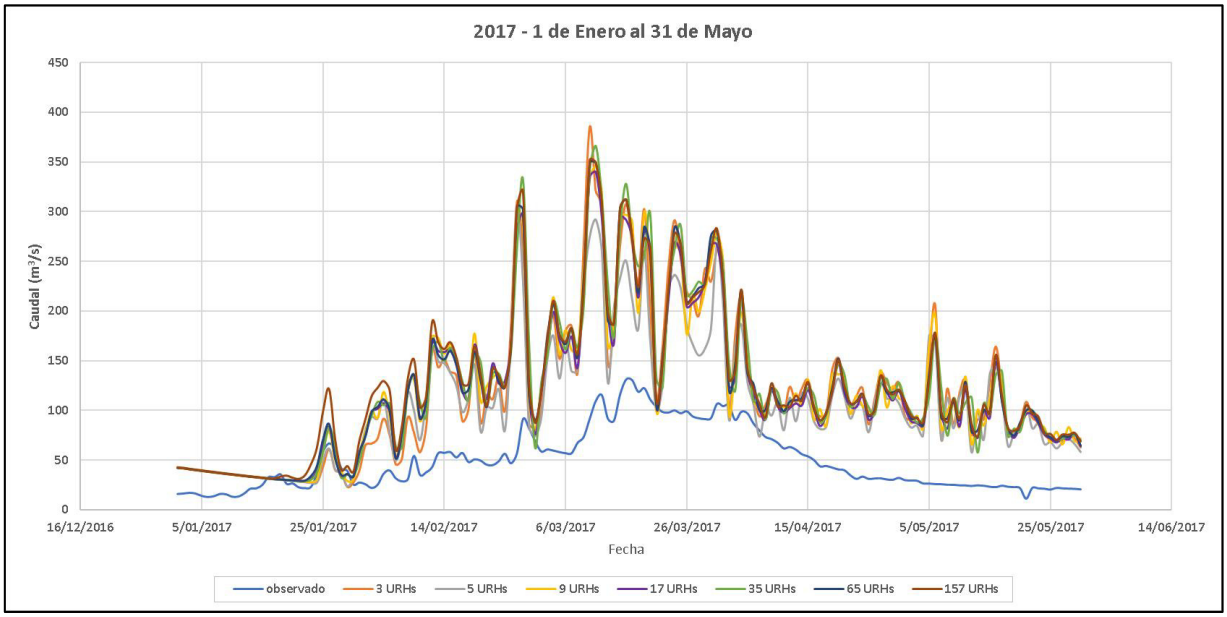
Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados generados en HEC-HMS v.4.13.0 para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, y de los registros hidrométricos de referencia de la estación de aforo Sayán para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016.

Figura 13

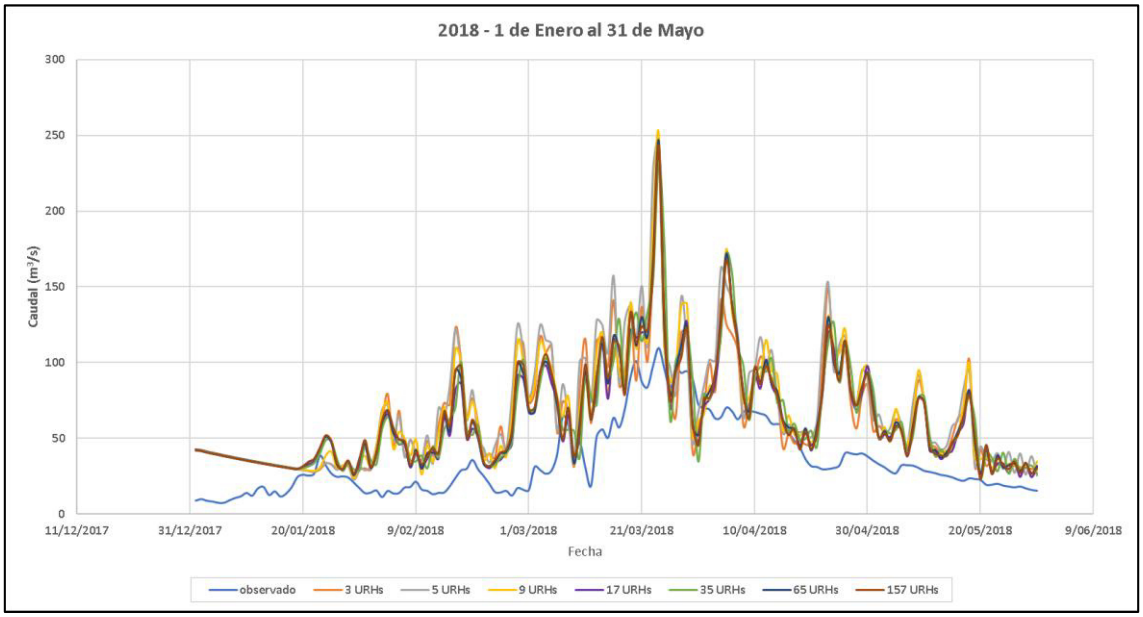
Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2017



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados generados en HEC-HMS v.4.13.0 para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, y de los registros hidrométricos de referencia de la estación de aforo Sayán para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2017.

Figura 14

Comparación entre el hidrograma observado y los hidrogramas simulados para los escenarios de discretización espacial durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2018



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados generados en HEC-HMS v.4.13.0 para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, y de los registros hidrométricos de referencia de la estación de aforo Sayán para el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2018.

En términos generales, los hidrogramas simulados presentaron una respuesta hidrológica de mayor magnitud respecto a los registros observados en Sayán. Esta diferencia fue más notoria durante los periodos de mayor caudal, donde los escenarios simulados alcanzaron picos superiores a los observados. No obstante, esta diferencia no fue interpretada como un error directo de calibración, debido a que el modelo representa caudales naturales diarios simulados, mientras que la serie observada en Sayán puede estar influenciada por regulación hidráulica aguas arriba.

Asimismo, se observó que los escenarios de mayor discretización espacial presentaron hidrogramas con formas relativamente similares entre sí. En particular, los escenarios de 17, 65 y 153 URHs mostraron comportamientos temporales cercanos, lo que sugiere que, a partir de determinados niveles de discretización, el incremento del número de URHs no necesariamente produce cambios sustanciales en la forma general de los hidrogramas simulados.

Por ello, la comparación visual de hidrogramas permitió identificar dos aspectos relevantes. Primero, que los caudales simulados y los caudales observados en Sayán presentan diferencias de magnitud que deben interpretarse considerando la posible regulación hidráulica existente. Segundo, que entre los escenarios simulados existe una tendencia a la estabilización de la respuesta hidrológica conforme aumenta el nivel de discretización espacial.

4.2. Análisis descriptivo de caudales y volúmenes simulados por escenarios

El análisis descriptivo de los caudales permitió evaluar la magnitud de la respuesta hidrológica simulada en cada escenario de discretización espacial. Para ello, se consideraron indicadores como el caudal máximo, caudal medio, mediana, percentiles de caudal y volumen bajo el hidrograma. Estos indicadores permitieron comparar los resultados entre escenarios y analizar si el aumento del número de URHs generó variaciones relevantes en los caudales naturales diarios simulados.

Tabla 9

Resumen de caudales máximos por escenario de discretización espacial

Escenario	2016	2017	2018
Observado	109.85	130.55	109.71
3 URHs	229.23	384.96	232.19
5 URHs	253.54	300.00	245.42

Escenario	2016	2017	2018
9 URHs	204.36	345.16	251.24
17 URHs	172.61	340.07	238.40
35 URHs	186.46	365.96	232.87
65 URHs	166.21	349.11	246.47
153 URHs	177.05	351.72	243.67

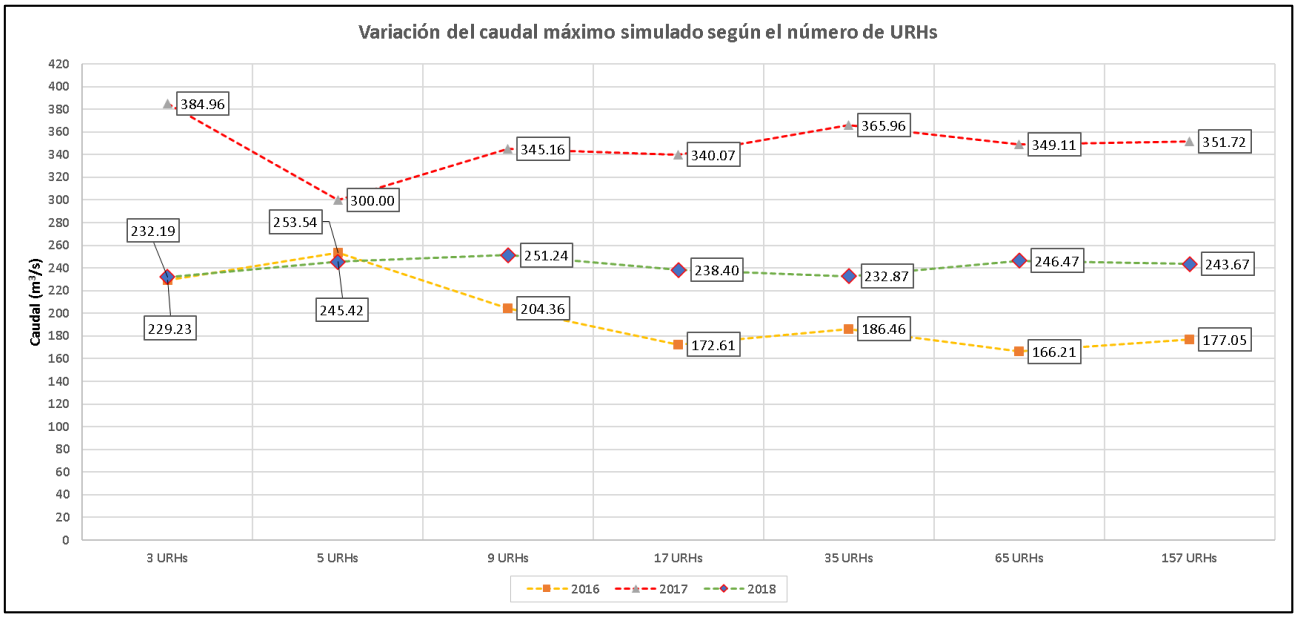
Nota. URHs = Unidades de Respuesta Hidrológica; Los valores de caudales se expresan en m^3/s. Elaboración propia a partir de los resultados de simulación hidrológica generados en HEC-HMS v.4.13.0 para los periodos comprendidos entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016, 2017 y 2018.

Los caudales máximos en la Tabla 9 evidenciaron que la respuesta de los escenarios simulados varió según el nivel de discretización espacial. En algunos periodos, los escenarios con menor número de URHs presentaron picos elevados, mientras que los escenarios de mayor discretización mostraron una distribución más detallada de la respuesta hidrológica. Esto indica que el caudal máximo es una variable sensible al nivel de discretización, debido a que depende de la forma en que el modelo representa la concentración de escorrentía, los tiempos de respuesta y la distribución espacial de los aportes.

A partir de los valores de caudal máximo obtenidos para cada escenario de discretización espacial, se elaboró una representación gráfica con el propósito de visualizar la variación de los caudales máximos simulados frente al número de URHs. Esta comparación permite identificar si el incremento del nivel de discretización genera cambios relevantes en la magnitud de los caudales máximos simulados para los años 2016, 2017 y 2018.

Figura 15

Variación del caudal máximo simulado según el número de URHs para los años 2016, 2017 y 2018



Nota. Elaboración propia a partir de los caudales máximos simulados en HEC-HMS para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs.

Como se observa en la Figura 15, los caudales máximos simulados presentan variaciones según el número de URHs considerado. El año 2017 registra los mayores caudales máximos en todos los escenarios, mientras que 2018 presenta un comportamiento más estable entre los diferentes niveles de discretización. Asimismo, se aprecia que los escenarios de 65 y 153 URHs muestran valores relativamente próximos, especialmente en 2017 y 2018, lo cual evidencia una tendencia hacia la estabilización de la respuesta hidrológica simulada.

Tabla 10

Resumen de volúmenes por escenario de discretización espacial

Escenario	2016	2017	2018
Observado	300.89	638.15	458.39
3 URHs	675.01	1,542.44	843.60
5 URHs	719.98	1,409.77	910.66
9 URHs	712.24	1,570.86	861.08
17 URHs	650.88	1,554.81	808.07
35 URHs	657.89	1,607.46	831.87
65 URHs	657.25	1,592.61	828.57
153 URHs	708.54	1,633.23	827.65

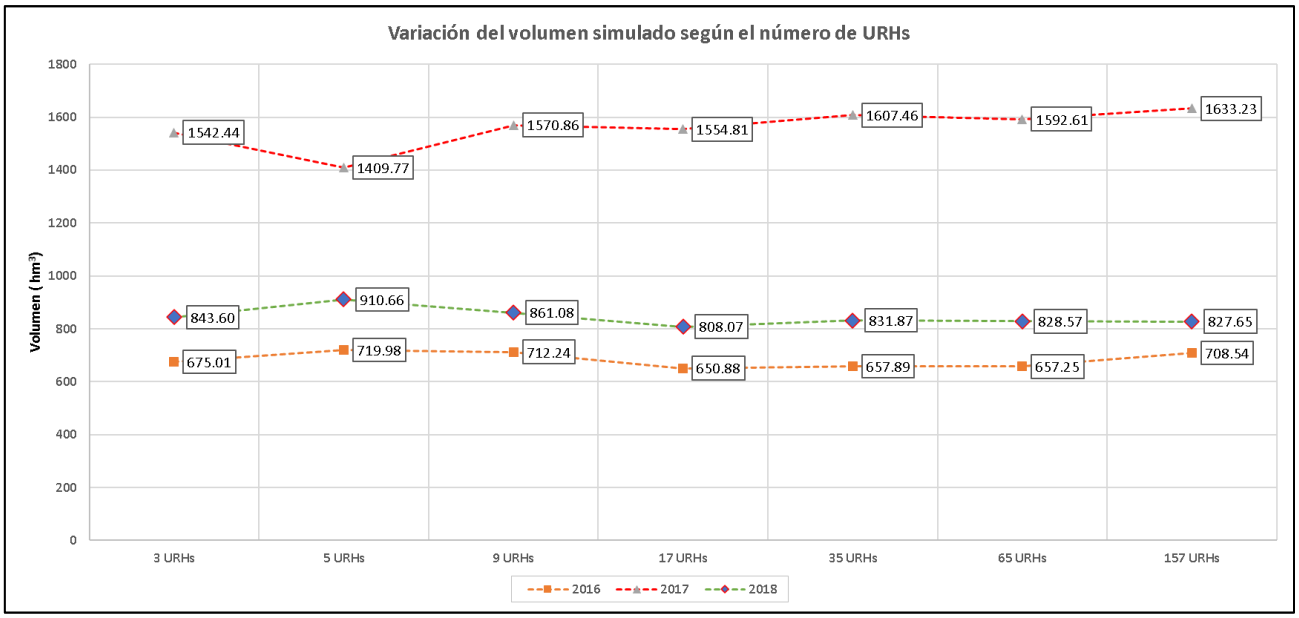
Nota. URHs = Unidades de Respuesta Hidrológica; Los valores de volumen se expresan en hm^3. Elaboración propia a partir de los resultados de simulación hidrológica generados en HEC-HMS v.4.13.0 para los periodos comprendidos entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016, 2017 y 2018.

Por otro lado, los volúmenes bajo los hidrogramas en la Tabla 10 permitieron analizar la respuesta acumulada de la cuenca durante cada periodo de simulación. A diferencia del caudal máximo, el volumen representa el comportamiento integral del hidrograma, por lo que resulta útil para comparar la magnitud total de agua simulada en cada escenario. Los resultados mostraron que los volúmenes no necesariamente aumentaron o disminuyeron de manera proporcional al número de URHs, lo que evidencia que una mayor discretización espacial no implica automáticamente una mejora directa o una modificación uniforme de la respuesta hidrológica.

Asimismo, se analizó la variación del volumen simulado bajo el hidrograma para cada escenario de discretización espacial. Este análisis permite evaluar si el incremento del número de URHs modifica de manera significativa el volumen total generado por el modelo hidrológico durante los periodos de simulación considerados. La Figura 16 presenta la variación del volumen simulado según el número de URHs para los años 2016, 2017 y 2018.

Figura 16

Variación del volumen simulado según el número de URHs para los años 2016, 2017 y 2018



Nota. Elaboración propia a partir de los volúmenes simulados en HEC-HMS para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs.

Como se observa en la Figura 16, el volumen simulado presentó variaciones entre los escenarios de discretización espacial. El año 2017 registró los mayores volúmenes en todas las configuraciones, mientras que 2016 y 2018 presentaron valores menores. Las diferencias respecto del escenario de 153 URHs no disminuyeron de manera estrictamente monotónica al aumentar el número de unidades. No obstante, los escenarios de 17, 35 y 65 URHs mantuvieron diferencias relativas de volumen menores o iguales a 15 % en los tres periodos evaluados. Por

tanto, el comportamiento del volumen respalda la existencia de una zona de estabilización, aunque con oscilaciones entre los diferentes niveles de discretización.

Tabla 11

Estadísticos descriptivos de los caudales diarios simulados por escenario de discretización espacial

Periodo	Escenario	Media (m^3/s)	Mediana / P50 (m^3/s)	P25 (m^3/s)	P75 (m^3/s)	P90 (m^3/s)	Máximo (m^3/s)
2016	3 URHs	52.32	40.09	29.81	60.01	95.93	229.23
2016	5 URHs	55.80	41.81	31.27	69.45	111.89	253.54
2016	9 URHs	55.19	41.12	30.47	68.48	106.31	204.36
2016	17 URHs	50.45	38.28	29.72	60.38	94.31	172.61
2016	35 URHs	50.99	39.15	29.21	61.24	96.36	186.46
2016	65 URHs	50.94	38.57	29.89	61.84	96.20	166.21
2016	153 URHs	54.90	40.38	31.38	70.63	103.94	177.05
2017	3 URHs	119.37	102.43	68.91	152.14	242.56	384.96
2017	5 URHs	109.12	99.64	66.85	139.22	204.01	300.00
2017	9 URHs	121.59	103.97	77.56	156.76	240.16	345.16
2017	17 URHs	120.33	104.63	72.92	150.88	225.73	340.07
2017	35 URHs	124.41	110.13	73.52	156.09	245.26	365.96
2017	65 URHs	123.24	108.56	74.97	153.02	229.65	349.11
2017	153 URHs	126.39	112.56	77.75	156.56	226.77	351.72
2018	3 URHs	65.33	55.69	37.21	86.73	114.03	232.19
2018	5 URHs	70.49	58.73	37.97	95.60	122.36	245.42
2018	9 URHs	66.70	55.23	37.50	89.82	113.65	251.24
2018	17 URHs	62.60	51.72	36.54	80.93	111.52	238.40
2018	35 URHs	64.42	54.53	37.04	83.52	112.49	232.87
2018	65 URHs	64.18	54.03	37.66	83.85	111.76	246.47
2018	153 URHs	64.10	52.74	37.99	83.02	113.39	243.67

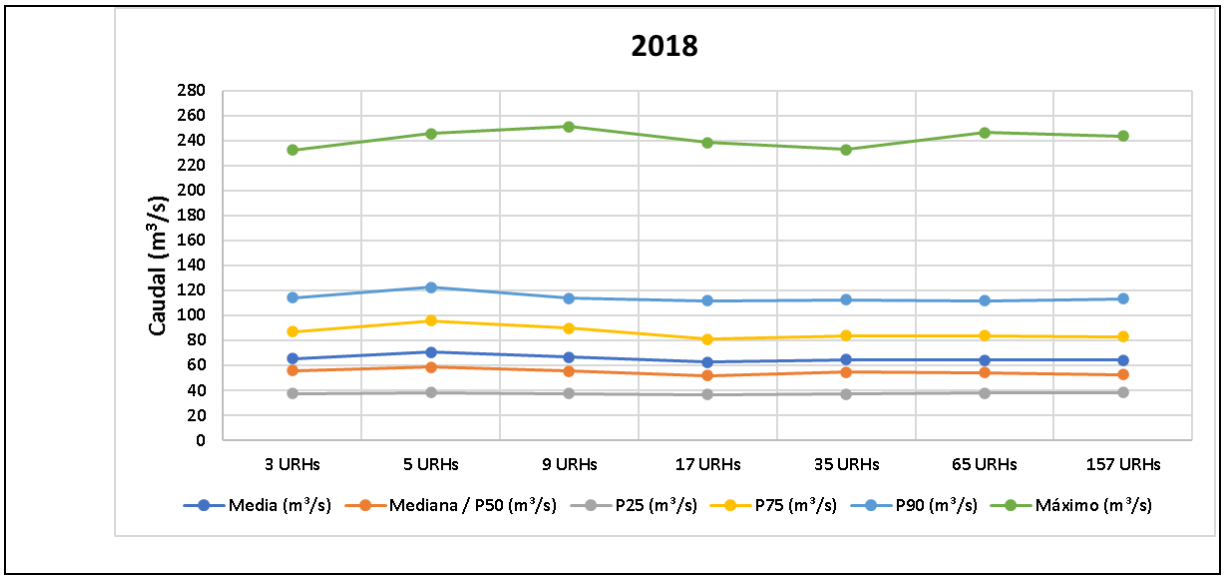
Asimismo, como se muestra en la Tabla 11 el análisis de caudales medios, medianas y

percentiles permitió complementar la interpretación de los hidrogramas simulados. Estos estadísticos permitieron evaluar no solo los valores extremos, sino también el comportamiento central y la distribución general de los caudales diarios simulados. De esta manera, se evitó interpretar la influencia de la discretización únicamente a partir de los caudales máximos, los cuales pueden ser más sensibles a eventos puntuales.

Figura 17

Variación de los estadísticos descriptivos de los caudales diarios simulados según el número de URHs en los periodos 2016, 2017 y 2018





Nota. La figura presenta la variación de la media, mediana (P50), percentiles P25, P75 y P90, y caudal máximo de los caudales diarios simulados para los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs en los periodos 2016, 2017 y 2018. La representación permite comparar el comportamiento central, la dispersión y los valores extremos de los hidrogramas simulados en función del nivel de discretización espacial.

Como se muestra en la Figura 17, la comparación de la media, mediana, percentiles y caudal máximo permitió evaluar de forma integral la respuesta hidrológica simulada en función del número de URHs. En los tres periodos analizados, los estadísticos centrales y de posición presentaron variaciones relativamente moderadas entre escenarios, mientras que el caudal máximo mostró una mayor sensibilidad al nivel de discretización espacial. En particular, el periodo 2017 presentó las mayores magnitudes de caudal, mientras que en 2016 y 2018 se observó una mayor estabilidad entre escenarios. En conjunto, estos resultados muestran que la discretización espacial influye en la respuesta hidrológica simulada, aunque su efecto es más notorio en los valores extremos que en el comportamiento central de la serie.

En conjunto, los resultados descriptivos permitieron reconocer que el nivel de discretización espacial influye en la magnitud y distribución de los caudales simulados; sin

embargo, dicha influencia no presentó un comportamiento estrictamente proporcional al incremento del número de URHs. Este resultado justifica la necesidad de complementar el análisis descriptivo con métricas de distancia, similitud y sensibilidad entre escenarios.

4.3. Contraste estadístico complementario con la estación de aforo Sayán

El contraste estadístico con la estación de aforo Sayán se realizó con el propósito de contextualizar la relación entre los caudales naturales diarios simulados y la referencia hidrométrica disponible. Para ello, se calcularon indicadores de correlación, principalmente los coeficientes de Pearson y Spearman, entre la serie observada en Sayán y las series simuladas. Estos indicadores permitieron evaluar si los hidrogramas simulados presentaron una relación temporal con la serie observada, sin asumir que dicha comparación represente una validación estricta del modelo, ver Tabla 12.

Tabla 12

Contraste estadístico complementario entre la estación Sayán y los escenarios simulados

Periodo	Escenario	Pearson vs Sayán	Spearman vs Sayán	NSE complementario	PBIAS complementario (%)
2016	3 URHs	0.252	0.378	-7.13	-125.78
2016	5 URHs	0.265	0.397	-8.69	-140.79
2016	9 URHs	0.295	0.413	-8.31	-138.19
2016	17 URHs	0.322	0.458	-5.83	-117.71
2016	35 URHs	0.322	0.454	-6.08	-120.05
2016	65 URHs	0.326	0.454	-5.99	-119.82
2016	153 URHs	0.401	0.527	-7.23	-136.92
2017	3 URHs	0.766	0.708	-7.55	-142.51
2017	5 URHs	0.729	0.677	-5.03	-121.68
2017	9 URHs	0.775	0.728	-7.64	-147.02
2017	17 URHs	0.798	0.754	-7.18	-144.46
2017	35 URHs	0.811	0.756	-8.14	-152.75

Periodo	Escenario	Pearson vs Sayán	Spearman vs Sayán	NSE complementario	PBIAS complementario (%)
2017	65 URHs	0.799	0.760	-7.90	-150.38
2017	153 URHs	0.801	0.770	-8.30	-156.78
2018	3 URHs	0.631	0.593	-1.78	-84.29
2018	5 URHs	0.679	0.634	-2.57	-98.85
2018	9 URHs	0.706	0.653	-1.82	-88.14
2018	17 URHs	0.734	0.685	-1.14	-76.57
2018	35 URHs	0.740	0.679	-1.40	-81.70
2018	65 URHs	0.731	0.688	-1.36	-81.03
2018	153 URHs	0.718	0.672	-1.37	-80.82

Nota. Pearson y Spearman representan la asociación temporal entre la serie observada en Sayán y cada escenario simulado. NSE y PBIAS se presentan como indicadores complementarios de contraste. Sus valores describen las diferencias entre las series, pero no permiten identificar por sí mismos el origen de dichas diferencias. Por ello, no fueron empleados como criterios de calibración o validación estricta. La posible regulación hidráulica aguas arriba se consideró como una hipótesis relevante de interpretación, conjuntamente con las incertidumbres asociadas a los datos de entrada, los parámetros del modelo y la configuración temporal. URHs = Unidades de Respuesta Hidrológica.

Los valores negativos de NSE y los valores de PBIAS alejados de cero evidenciaron diferencias importantes de magnitud entre los caudales naturales diarios simulados y los registros de Sayán. Esta diferencia constituye un resultado directamente sustentado por las métricas calculadas. Sin embargo, dichos indicadores no permiten determinar por sí mismos la causa de la discrepancia ni deben interpretarse, en este estudio, como una medida concluyente del desempeño absoluto del modelo, debido al carácter complementario de la referencia hidrométrica utilizada y a la ausencia de una calibración y validación estrictas.

En el caso del escenario de 153 URHs, los coeficientes de correlación frente a Sayán

mostraron valores diferenciados entre periodos. Para el periodo 2016, se obtuvo una correlación de Pearson de 0.401 y una correlación de Spearman de 0.527, lo que indica una relación moderada entre ambas series. Para el periodo 2017, los valores aumentaron a 0.801 en Pearson y 0.770 en Spearman, evidenciando una relación temporal más fuerte. En el periodo 2018, se obtuvieron valores de 0.718 en Pearson y 0.672 en Spearman, lo que también refleja una asociación positiva entre la serie observada y la serie simulada.

Los coeficientes de correlación mostraron que existe una asociación temporal diferenciada entre la serie observada y la serie simulada, con valores más elevados durante 2017 y 2018. No obstante, la presencia de correlación temporal no implica coincidencia en la magnitud de los caudales ni permite identificar la causa de las diferencias registradas.

La posible influencia de la regulación hidráulica ubicada aguas arriba de la estación Sayán constituye una hipótesis relevante para interpretar estas discrepancias, pero no representa una causa demostrada dentro de la investigación. También deben considerarse otras fuentes de incertidumbre, como la representatividad espacial de la precipitación interpolada, la estimación y el ajuste global de los valores de Número de Curva, los parámetros de flujo base adoptados sin calibración hidrométrica estricta, la parametrización del tránsito mediante Muskingum, la resolución temporal diaria de la precipitación y de los resultados analizados, la aplicación del método SCS-CN en simulación continua y la calidad y representatividad del registro hidrométrico disponible.

Debido a que no se realizó un análisis específico de propagación de incertidumbres ni se dispuso de una serie naturalizada independiente para calibración y validación, no fue posible cuantificar la contribución individual de cada una de estas fuentes a las diferencias observadas. En consecuencia, el contraste con Sayán se utilizó exclusivamente para contextualizar la magnitud y el comportamiento temporal de los resultados, mientras que la evaluación principal

se mantuvo centrada en la comparación interna de los escenarios respecto de la referencia de 153 URHs.

4.4. Análisis de sensibilidad respecto al escenario de 153 URHs

El análisis de sensibilidad se desarrolló tomando como referencia interna el escenario de 153 URHs, por ser la configuración de mayor discretización espacial evaluada en la investigación. Esta referencia no fue asumida como una verdad observada, sino como el escenario de mayor detalle espacial dentro del conjunto de simulaciones. A partir de ello, se compararon los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35 y 65 URHs respecto al escenario de 153 URHs mediante métricas de distancia, sesgo y correlación.

De manera complementaria, también se incorporó la serie observada de la estación Sayán dentro de la comparación respecto al escenario de 153 URHs, con el propósito de contextualizar la distancia entre la referencia hidrométrica disponible y el escenario de mayor discretización espacial. Esta comparación no fue interpretada como validación directa, sino como un contraste complementario de magnitud y comportamiento temporal, ver Tabla 13.

Tabla 13

Métricas de distancia, sesgo y similitud respecto al escenario de 153 URHs

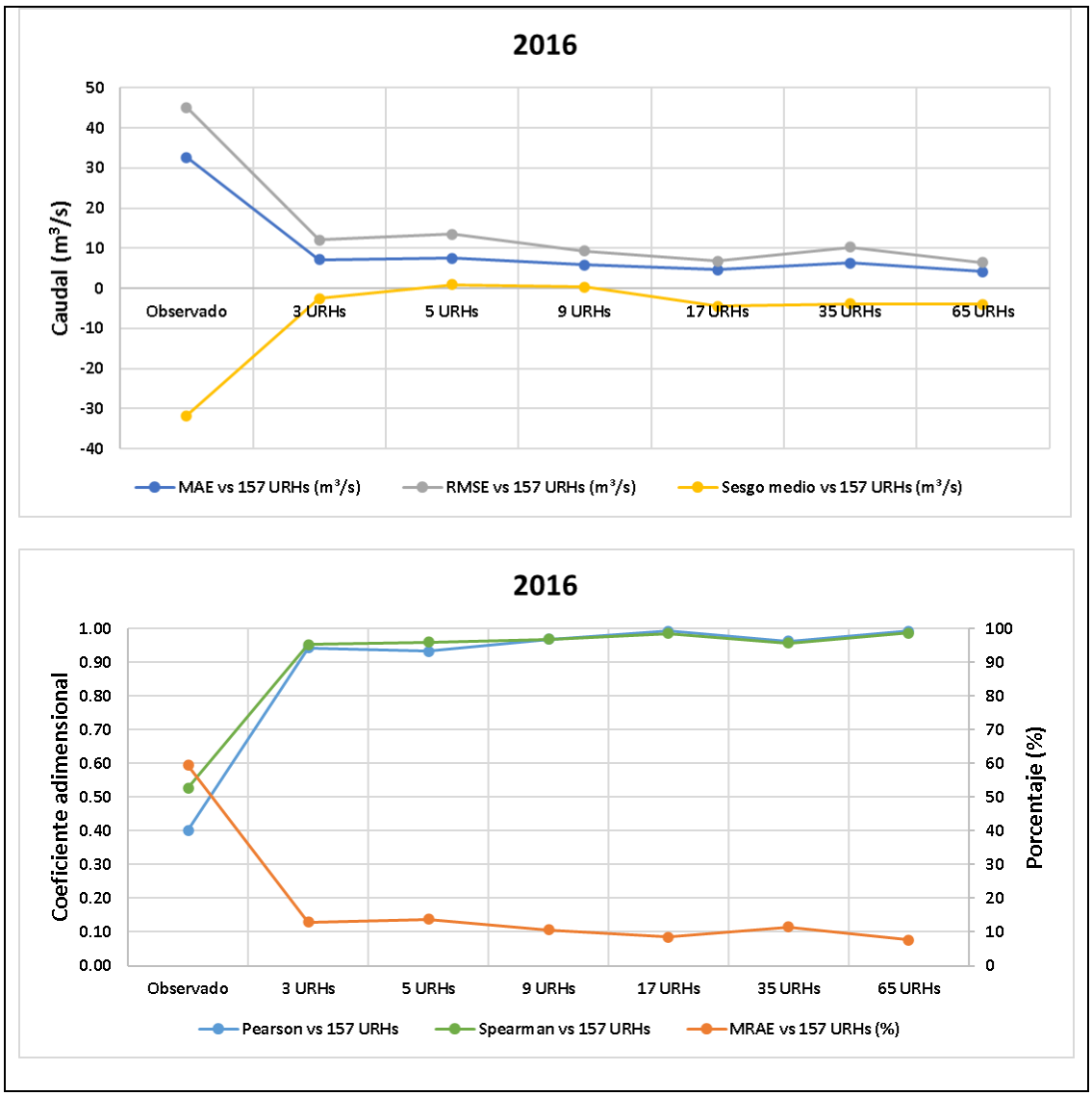
Periodo	Serie comparada	MAE vs 153 URHs (m^3/s)	MRAE vs 153 URHs (%)	RMSE vs 153 URHs (m^3/s)	Sesgo medio vs 153 URHs (m^3/s)	Pearson vs 153 URHs	Spearman vs 153 URHs	Cumple MRAE, Pearson y Spearman
2016	Observado	32.61	59.41	45.16	-31.73	0.401	0.527	No
2016	3 URHs	7.10	12.94	12.04	-2.58	0.943	0.952	Sí
2016	5 URHs	7.57	13.80	13.55	0.90	0.933	0.959	Sí
2016	9 URHs	5.86	10.68	9.30	0.30	0.968	0.968	Sí
2016	17 URHs	4.65	8.46	6.83	-4.45	0.992	0.985	Sí
2016	35 URHs	6.29	11.45	10.26	-3.91	0.963	0.957	Sí

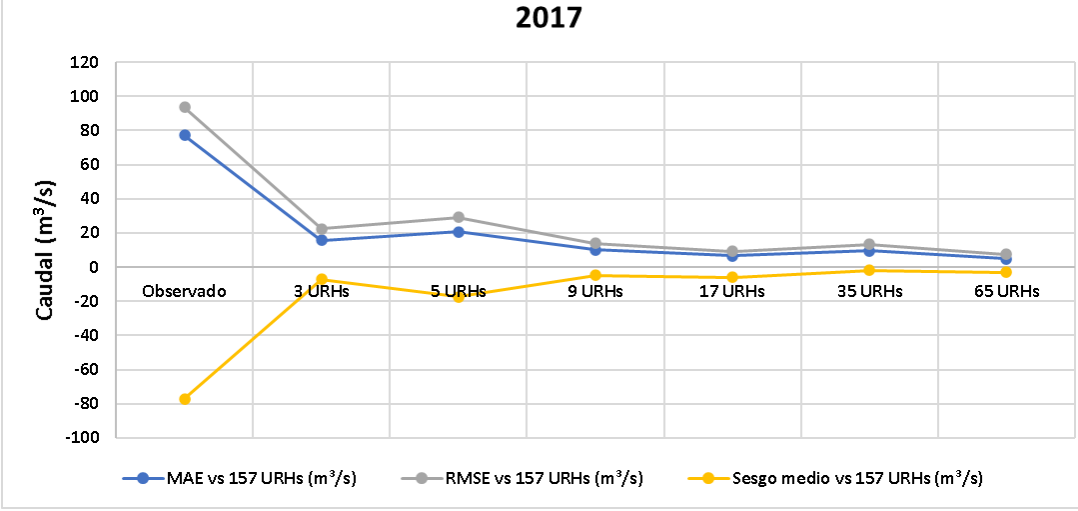
Periodo	Serie comparada	MAE vs 153 URHs (m^3/s)	MRAE vs 153 URHs (%)	RMSE vs 153 URHs (m^3/s)	Sesgo medio vs 153 URHs (m^3/s)	Pearson vs 153 URHs	Spearman vs 153 URHs	Cumple MRAE, Pearson y Spearman
2016	65 URHs	4.17	7.60	6.47	-3.96	0.992	0.987	Sí
2017	Observado	77.26	61.12	93.48	-77.17	0.801	0.770	No
2017	3 URHs	15.75	12.46	22.36	-7.02	0.960	0.924	Sí
2017	5 URHs	20.69	16.37	29.05	-17.28	0.955	0.932	No
2017	9 URHs	10.23	8.09	13.92	-4.80	0.984	0.966	Sí
2017	17 URHs	6.74	5.33	9.40	-6.06	0.995	0.988	Sí
2017	35 URHs	9.44	7.47	13.29	-1.98	0.985	0.969	Sí
2017	65 URHs	4.99	3.95	7.65	-3.15	0.996	0.987	Sí
2018	Observado	29.85	46.56	37.31	-28.65	0.718	0.672	No
2018	3 URHs	9.01	14.06	12.32	1.23	0.938	0.916	Sí
2018	5 URHs	11.48	17.92	16.35	6.39	0.929	0.909	No
2018	9 URHs	6.47	10.09	8.86	2.60	0.974	0.961	Sí
2018	17 URHs	2.69	4.19	3.77	-1.51	0.995	0.994	Sí
2018	35 URHs	5.71	8.91	8.77	0.31	0.969	0.962	Sí
2018	65 URHs	1.90	2.97	2.72	0.08	0.997	0.996	Sí

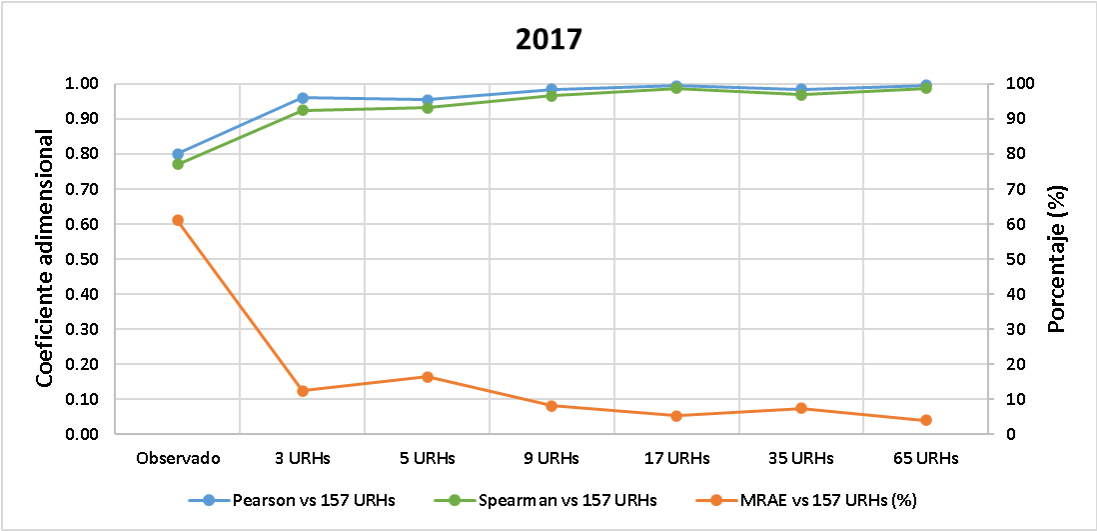
Nota. El escenario de 153 URHs fue utilizado como referencia interna de mayor discretización espacial. MAE = error absoluto medio; MRAE = error absoluto medio relativo; RMSE = error cuadrático medio; URHs = Unidades de Respuesta Hidrológica. La fila Observado corresponde al contraste de la serie Sayán respecto al escenario de 153 URHs y se interpreta como referencia hidrométrica complementaria.

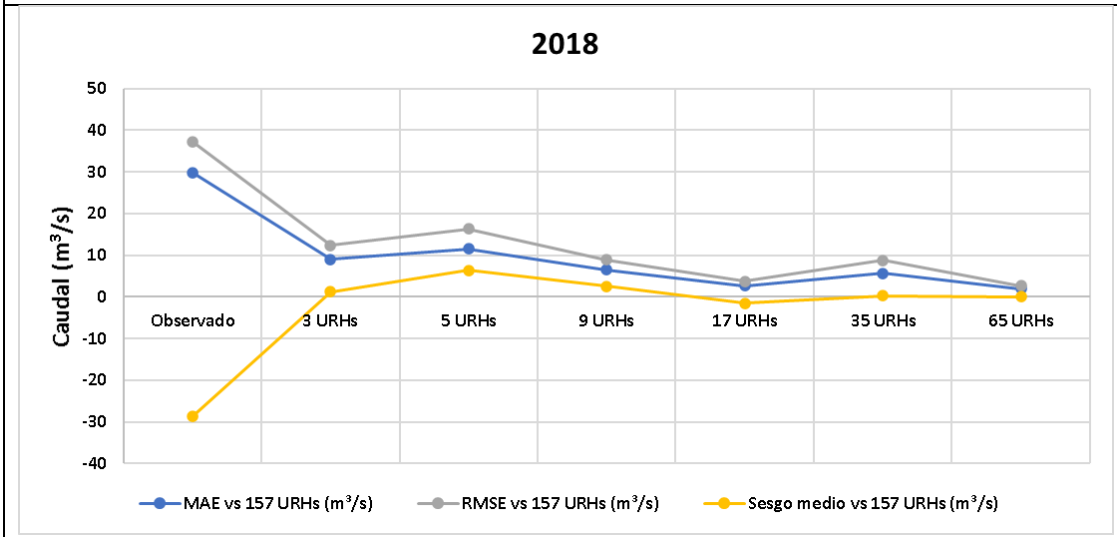
Figura 18

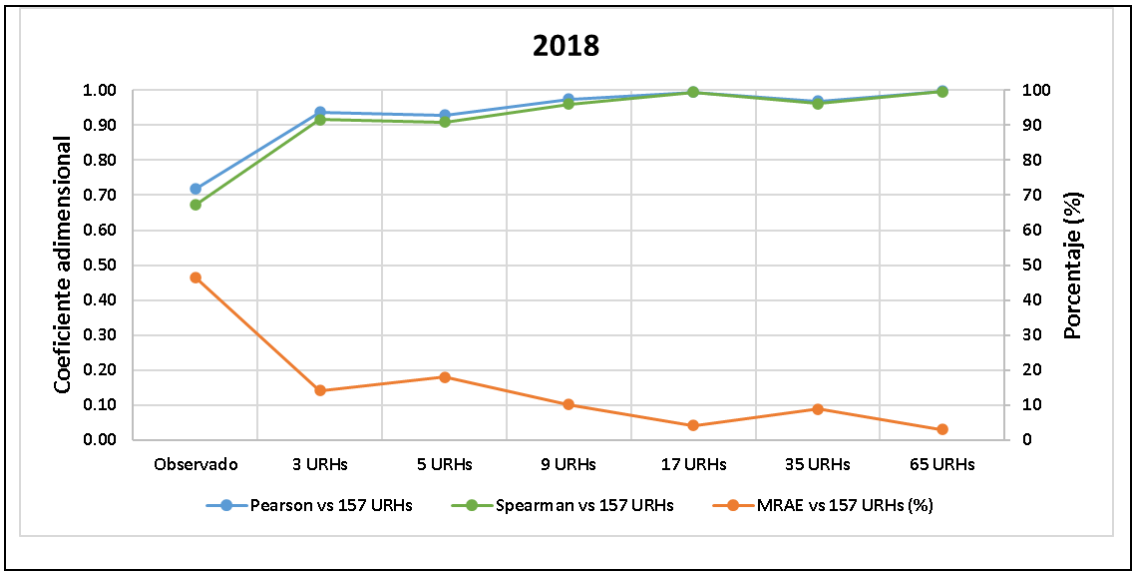
Métricas de diferencia, sesgo y similitud de los caudales diarios simulados respecto al escenario de 153 URHs para los años 2016, 2017 y 2018




2017
Caudal (m³/s)
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
Observado
3 URHs
5 URHs
9 URHs
17 URHs
35 URHs
65 URHs
MAE vs 157 URHs (m³/s)
RMSE vs 157 URHs (m³/s)
Sesgo medio vs 157 URHs (m³/s)


2017
Coeficiente adimensional
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
Porcentaje (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Observado
3 URHs
5 URHs
9 URHs
17 URHs
35 URHs
65 URHs
Pearson vs 157 URHs
Spearman vs 157 URHs
MRAE vs 157 URHs (%)


2018
Caudal (m³/s)
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
Observado
3 URHs
5 URHs
9 URHs
17 URHs
35 URHs
65 URHs
MAE vs 157 URHs (m³/s)
RMSE vs 157 URHs (m³/s)
Sesgo medio vs 157 URHs (m³/s)



Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS. El escenario de 153 URHs fue considerado como referencia interna para la comparación entre escenarios. Los gráficos de la columna izquierda muestran las métricas de diferencia y sesgo: MAE, RMSE y sesgo medio; mientras que los gráficos de la columna derecha muestran las métricas de similitud y diferencia relativa: Pearson, Spearman y MRAE. El valor "Observado" corresponde al contraste hidrométrico complementario con la estación de aforo.

Los resultados en la Figura 18 mostraron que los escenarios de mayor discretización presentaron menores diferencias respecto al escenario de 153 URHs. Entre los escenarios de menor discretización evaluados, la configuración de 65 URHs presentó la mayor cercanía general respecto de la referencia interna de 153 URHs durante los tres periodos analizados. Para 2016, el escenario de 65 URHs presentó un MAE de 4.17 m^3/s, un MRAE de 7.60 %, un RMSE de 6.47 m^3/s y un sesgo medio de -3.96 m^3/s. Para 2017, los valores fueron 4.99 m^3/s, 3.95 %, 7.65 m^3/s y -3.15 m^3/s, respectivamente. Para 2018, estos valores disminuyeron a 1.90 m^3/s, 2.97 %, 2.72 m^3/s y 0.08 m^3/s.

Estos resultados evidencian que el escenario de 65 URHs presentó una alta similitud respecto al escenario de mayor discretización espacial. El MRAE fue bajo en los tres periodos,

especialmente en 2017 y 2018, lo que indica que la diferencia promedio entre ambos escenarios fue reducida en relación con la magnitud media del escenario de 153 URHs. Asimismo, el sesgo medio cercano a cero en 2018 evidencia que ambos escenarios presentaron valores promedio prácticamente equivalentes durante ese periodo.

Las correlaciones de Pearson y Spearman también confirmaron la alta similitud entre los escenarios de mayor discretización. En el caso de 65 URHs respecto a 153 URHs, los valores de Pearson fueron 0.992, 0.996 y 0.997 para 2016, 2017 y 2018, respectivamente. De manera similar, los valores de Spearman fueron 0.987, 0.987 y 0.996. Estos resultados indican que ambos escenarios no solo presentaron magnitudes cercanas, sino también una estructura temporal muy similar en sus hidrogramas.

El escenario de 17 URHs también presentó una aproximación importante respecto al escenario de 153 URHs, con valores elevados de correlación y diferencias relativamente bajas. Esto sugiere que la estabilización de la respuesta hidrológica simulada comienza a observarse desde niveles intermedios de discretización espacial. Sin embargo, el escenario de 65 URHs fue el que mostró la mayor cercanía general respecto al escenario de 153 URHs.

En términos generales, los escenarios de menor discretización presentaron las mayores diferencias respecto del escenario de 153 URHs. Sin embargo, estas diferencias no se redujeron progresivamente con cada incremento del número de unidades. Los valores de MRAE, sesgo, caudal máximo y volumen mostraron oscilaciones no monotónicas entre escenarios, como ocurrió al pasar de 3 a 5 URHs y de 17 a 35 URHs. A pesar de estas oscilaciones, se identificó una tendencia general hacia menores diferencias y mayores correlaciones en las configuraciones intermedias y altas. Por ello, la estabilización fue determinada mediante el cumplimiento conjunto de los cinco criterios operativos y no mediante la existencia de una secuencia estrictamente decreciente.

4.5. Evaluación de la estabilización de resultados frente al número de URHs

La evaluación de la estabilización permitió determinar a partir de qué nivel de discretización espacial las diferencias de la respuesta hidrológica simulada se mantienen dentro de las tolerancias establecidas. Para este análisis se utilizó el escenario de 153 URHs como referencia interna de mayor discretización espacial. Por tanto, los resultados expresan la convergencia entre configuraciones del modelo y no constituyen una evaluación de exactitud respecto de los caudales observados en la estación Sayán.

De acuerdo con el criterio operativo establecido en la metodología, un escenario fue considerado estable cuando cumplió simultáneamente, en cada uno de los periodos 2016, 2017 y 2018, las siguientes condiciones: MRAE menor o igual a 15 %; diferencia relativa absoluta del caudal máximo diario simulado menor o igual a 15 %; diferencia relativa absoluta del volumen total menor o igual a 15 %; coeficiente de correlación de Pearson mayor o igual a 0.90; y coeficiente de correlación de Spearman mayor o igual a 0.90. Asimismo, para identificar el inicio de la estabilización, el cumplimiento de los cinco criterios debía mantenerse en los escenarios posteriores de mayor discretización.

El escenario de 3 URHs no cumplió el criterio de estabilización debido a que, durante 2016, presentó una diferencia relativa absoluta de 29.47 % en el caudal máximo diario respecto del escenario de 153 URHs. Aunque sus valores de MRAE, volumen y correlación se encontraron dentro de los límites establecidos, el incumplimiento de uno de los cinco criterios impidió clasificarlo como estable.

El escenario de 5 URHs tampoco alcanzó la estabilización. En este caso, el MRAE fue de 16.37 % en 2017 y 17.92 % en 2018, valores superiores al límite de 15 %. Asimismo, la diferencia relativa absoluta del caudal máximo diario alcanzó 43.20 % en 2016. Estos resultados evidencian que una representación espacial con cinco unidades todavía genera variaciones

importantes en la magnitud y distribución de los caudales simulados.

En el escenario de 9 URHs, el MRAE, el volumen total y los coeficientes de correlación cumplieron los límites establecidos en los tres periodos. Sin embargo, la diferencia relativa absoluta del caudal máximo diario fue de 15.43 % en 2016, ligeramente superior al límite de 15 %. Debido a la aplicación simultánea de los cinco criterios, este escenario no fue considerado estable.

El escenario de 17 URHs fue el primero que cumplió los cinco criterios en los tres periodos evaluados. Considerando el valor más desfavorable entre 2016, 2017 y 2018, presentó un MRAE máximo de 8.46 %, una diferencia máxima de 3.31 % en el caudal máximo diario y una diferencia máxima de 8.14 % en el volumen total. Asimismo, los valores mínimos de Pearson y Spearman fueron de 0.992 y 0.985, respectivamente. Estos resultados muestran que la respuesta hidrológica del escenario de 17 URHs se mantiene dentro de las tolerancias adoptadas respecto de la referencia de 153 URHs.

El cumplimiento de los criterios continuó en los escenarios de 35 y 65 URHs. El escenario de 35 URHs presentó, en el periodo más desfavorable, un MRAE de 11.45 %, una diferencia de 5.31 % en el caudal máximo diario, una diferencia de 7.15 % en el volumen total, un coeficiente de Pearson de 0.963 y un coeficiente de Spearman de 0.957. Por su parte, el escenario de 65 URHs registró un MRAE máximo de 7.60 %, una diferencia máxima de 6.12 % en el caudal máximo diario, una diferencia máxima de 7.24 % en el volumen total, un coeficiente mínimo de Pearson de 0.992 y un coeficiente mínimo de Spearman de 0.987. En ambos casos, los cinco indicadores permanecieron dentro de los límites establecidos.

En consecuencia, de acuerdo con la regla operativa adoptada, la estabilización de la respuesta hidrológica simulada comienza en el escenario de 17 URHs y se mantiene en los escenarios de 35 y 65 URHs. Esto no significa que las diferencias disminuyan de manera

estrictamente monotónica con cada incremento del número de unidades, sino que, a partir de 17 URHs, permanecen dentro de las tolerancias definidas en los tres periodos analizados.

Aunque el escenario de 17 URHs marca el inicio de la zona de estabilización, el escenario de 65 URHs conserva la mayor cercanía general con la configuración de 153 URHs, especialmente por sus menores valores de MRAE y sus elevados coeficientes de correlación. Por ello, debe diferenciarse entre el inicio operativo de la estabilización, identificado en 17 URHs, y el escenario alternativo con mayor semejanza respecto de la referencia interna, correspondiente a 65 URHs.

Los resultados muestran que la discretización espacial influye en los caudales naturales diarios simulados, principalmente en los escenarios de menor detalle. Sin embargo, una vez alcanzado el escenario de 17 URHs, el aumento posterior del número de unidades no produce variaciones suficientes para superar los límites establecidos. La estabilización identificada representa, por tanto, una convergencia interna entre configuraciones del modelo y no una validación de los caudales simulados frente a valores observados.

4.6. Discusión general de resultados

La comparación respecto del escenario de 153 URHs mostró que el nivel de discretización espacial influye en la magnitud, el volumen y el comportamiento temporal de los caudales naturales diarios simulados. Sin embargo, las variaciones no siguieron una trayectoria lineal ni una disminución estrictamente monotónica. Algunos incrementos del número de URHs produjeron una mayor cercanía con la referencia, mientras que otros generaron aumentos temporales de determinadas métricas.

A pesar de estas oscilaciones, los escenarios de discretización intermedia y alta presentaron una tendencia general hacia menores diferencias respecto del escenario de 153 URHs. La aplicación conjunta de los criterios operativos permitió identificar que el escenario

de 17 URHs fue el primero que alcanzó la estabilización y que esta condición se mantuvo en los escenarios de 35 y 65 URHs. Entre ellos, el escenario de 65 URHs presentó la mayor cercanía general con la referencia interna. Por tanto, debe diferenciarse entre una tendencia general de estabilización y una disminución monotónica de las diferencias, ya que esta última no fue observada en la secuencia numérica de los resultados.

El análisis respecto del escenario de 153 URHs permitió identificar que, entre las configuraciones con menor discretización que la referencia, el escenario de 65 URHs presentó la mayor similitud general durante los periodos evaluados. Esta cercanía se reflejó en las métricas de distancia, sesgo y correlación. Sin embargo, el resultado expresa únicamente similitud entre configuraciones del modelo y no demuestra que el escenario de 65 URHs sea el más preciso, óptimo o adecuado para representar el comportamiento hidrológico real de la cuenca. Una afirmación de esa naturaleza requeriría una validación hidrométrica independiente.

Respecto a la estación de aforo Sayán, los resultados mostraron diferencias de magnitud entre los caudales observados y simulados. No obstante, esta diferencia fue interpretada considerando la posible influencia de regulación hidráulica aguas arriba. En ese sentido, Sayán fue empleada exclusivamente como referencia hidrométrica complementaria y contextual, y no como una serie natural no regulada para la calibración o validación estricta del modelo. Esta decisión metodológica permitió evitar una interpretación forzada de los indicadores de bondad de ajuste y mantener el enfoque principal en la comparación entre escenarios de discretización.

Desde una perspectiva metodológica, el uso de métricas como MAE, MRAE, RMSE, sesgo medio, Pearson y Spearman permitió evaluar no solo la magnitud de las diferencias entre escenarios, sino también la similitud temporal de los hidrogramas. Esto fortaleció la interpretación de los resultados, debido a que permitió analizar la estabilidad de la respuesta hidrológica simulada desde diferentes criterios estadísticos.

En conjunto, los resultados indican que la discretización espacial constituye una decisión relevante dentro del modelamiento hidrológico semidistribuido. No obstante, el incremento del número de URHs debe evaluarse considerando la relación entre mejora en la representación espacial, estabilidad de los resultados y complejidad del modelo. Para la cuenca del río Huaura, los resultados sugieren que los escenarios de discretización intermedia y alta presentan respuestas hidrológicas similares, por lo que el uso de un número mayor de URHs no necesariamente implica una modificación sustancial de los caudales naturales diarios simulados.

En ese sentido, la investigación no buscó determinar un escenario "más exacto" frente a Sayán, sino evaluar la sensibilidad de los caudales naturales diarios simulados frente al nivel de discretización espacial. Las comparaciones internas entre los escenarios respaldan la hipótesis para los periodos y condiciones evaluados, al mostrar variaciones en los caudales simulados y una estabilización operativa a partir de 17 URHs, mantenida en los escenarios de 35 y 65 URHs respecto de la referencia interna de 153 URHs. Este respaldo es contextual y no constituye una demostración universal ni una prueba de exactitud frente a caudales naturales observados.

La interpretación de estos hallazgos se encuentra condicionada por el alcance temporal, los datos y la estructura metodológica de la investigación. El análisis comprendió únicamente los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018; utilizó el escenario de 153 URHs como referencia interna; no incluyó calibración ni validación hidrométrica estrictas; y no representó explícitamente la operación de la infraestructura hidráulica existente. Asimismo, las incertidumbres asociadas a los datos de entrada, los parámetros hidrológicos y la agregación de los resultados a escala diaria pueden influir en las magnitudes simuladas. Por tanto, la estabilización identificada expresa una convergencia interna entre configuraciones bajo las condiciones evaluadas y no una validación del comportamiento hidrológico real de la cuenca

En términos de alcance, estos hallazgos constituyen evidencia metodológica sobre la

sensibilidad y la estabilización interna de los resultados frente al nivel de discretización espacial. Su utilidad se limita a orientar la formulación de estudios posteriores y no sustenta por sí sola su aplicación directa en el diseño de infraestructura, la estimación oficial de disponibilidad hídrica, la asignación de agua o las decisiones operativas. Para extender los resultados hacia esas aplicaciones sería necesario incorporar la regulación hidráulica existente y realizar procesos de calibración y validación con información hidrométrica representativa.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Contrastación de la hipótesis

La hipótesis planteó que la discretización espacial de la cuenca del río Huaura genera variaciones en los caudales naturales diarios simulados y que, en los escenarios de discretización intermedia y alta, existe una tendencia general hacia menores diferencias respecto del escenario de 153 URHs, aunque sin seguir necesariamente una disminución monotónica.

Los resultados respaldan la hipótesis para los periodos y condiciones evaluados. La comparación entre los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs mostró variaciones en los caudales diarios, los hidrogramas y los volúmenes simulados. Estas diferencias no disminuyeron uniformemente con cada incremento del nivel de discretización, sino que presentaron oscilaciones entre escenarios. No obstante, la aplicación de los criterios operativos permitió identificar que la estabilización comenzó en 17 URHs y se mantuvo en los escenarios de 35 y 65 URHs, todos evaluados respecto de la referencia interna de 153 URHs. Este respaldo proviene de las comparaciones interescenario y no de una prueba de exactitud frente a caudales naturales observados ni de una validación hidrométrica estricta.

Esta estabilización se evidenció mediante las métricas de distancia, sesgo y similitud calculadas respecto al escenario de 153 URHs, considerado como referencia interna de mayor discretización espacial. En particular, el escenario de 65 URHs presentó valores de MRAE de 7.60 %, 3.95 % y 2.97 % para los periodos 2016, 2017 y 2018, respectivamente. Asimismo, las correlaciones de Pearson entre los escenarios de 65 y 153 URHs fueron 0.992, 0.996 y 0.997, mientras que las correlaciones de Spearman fueron 0.987, 0.987 y 0.996. Estos resultados evidencian una alta similitud temporal y estadística entre ambos escenarios.

En consecuencia, el escenario de 65 URHs fue identificado como la configuración de menor discretización con mayor cercanía general respecto de la referencia interna de 153 URHs durante los periodos analizados. Este resultado no implica que sea la configuración más precisa, óptima o adecuada para representar el comportamiento hidrológico real de la cuenca.

En ese sentido, se concluye que una mayor discretización espacial no necesariamente genera mejoras proporcionales en la respuesta hidrológica simulada. Si bien los escenarios de menor discretización presentan mayores diferencias respecto al escenario de mayor detalle, los escenarios de discretización intermedia y alta tienden a presentar resultados similares. Por ello, la selección del número de URHs debe considerar no solo el nivel de detalle espacial, sino también la estabilidad de los resultados, la calidad de la información disponible y la complejidad del modelo.

5.1.2. Conclusiones según los objetivos específicos

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que la reducción del umbral de área aportante acumulada desde 500 hasta 10 km² permitió generar siete escenarios conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs operacionales. El incremento del nivel de discretización redujo el área promedio de las unidades desde 947.07 km² en el escenario de 3 URHs hasta 18.57 km² en el escenario de 153 URHs, evidenciando una representación espacial progresivamente más detallada y jerárquicamente anidada. Este resultado corresponde al DEM de 12.5 m, al punto de salida fijado en Sayán y a los umbrales empleados, por lo que no demuestra que otras resoluciones topográficas o estrategias de delimitación produzcan la misma configuración.

Respecto del segundo objetivo específico, las seis estaciones pluviométricas presentaron 454 registros diarios cada una, distribuidos en 152 datos para 2016, 151 para 2017 y 151 para 2018, con un total de 2,724 valores estación-día. Las series alcanzaron una disponibilidad del

100 % y no presentaron fechas duplicadas, valores negativos ni datos faltantes durante los periodos evaluados, lo que permitió disponer de entradas completas y temporalmente homogéneas para las simulaciones. Sin embargo, el análisis se limitó a los meses de enero a mayo de 2016, 2017 y 2018, y la serie de caudales de Sayán solo pudo emplearse como referencia hidrométrica complementaria debido a su posible afectación por la regulación hidráulica aguas arriba y a la ausencia de una serie naturalizada.

En cuanto al tercer objetivo específico, se configuraron siete modelos hidrológicos semidistribuidos y se ejecutaron 21 casos de simulación, correspondientes a los siete escenarios durante los periodos de 2016, 2017 y 2018. La aplicación homogénea de los métodos SCS-CN, Hidrograma Unitario del SCS, Recession y Muskingum, juntamente con un intervalo computacional de un minuto y el posterior procesamiento a escala diaria, permitió obtener series comparables entre escenarios y reducir la influencia de diferencias metodológicas ajenas a la discretización espacial. No obstante, los parámetros no fueron determinados mediante calibración y validación hidrométrica estrictas y el modelo no representó explícitamente la operación de la infraestructura hidráulica existente; por tanto, los caudales generados deben interpretarse como salidas comparativas del modelo y no como series naturalizadas del régimen real.

En relación con el cuarto objetivo específico, la comparación respecto de la referencia interna de 153 URHs mostró que las diferencias entre escenarios no disminuyeron de manera estrictamente monotónica al aumentar el número de unidades, aunque se identificó una tendencia general hacia menores diferencias en las configuraciones intermedias y altas. Entre los escenarios de menor discretización, la configuración de 65 URHs presentó la mayor cercanía general, con valores de MRAE de 7.60 %, 3.95 % y 2.97 % para 2016, 2017 y 2018, respectivamente; coeficientes de Pearson entre 0.992 y 0.997; y coeficientes de Spearman entre

0.987 y 0.996. Estos valores expresan similitud interescenario respecto de la configuración de 153 URHs, pero no demuestran exactitud frente a caudales naturales observados ni permiten considerar a 65 URHs como la configuración óptima o más precisa para representar la cuenca real.

Respecto del quinto objetivo específico, el escenario de 17 URHs fue el primero que cumplió conjuntamente los cinco criterios operativos de estabilización durante los tres periodos evaluados, condición que se mantuvo en los escenarios de 35 y 65 URHs. En su periodo más desfavorable, la configuración de 17 URHs presentó un MRAE máximo de 8.46 %, una diferencia máxima de 3.31 % en el caudal máximo diario y de 8.14 % en el volumen total, además de coeficientes mínimos de Pearson y Spearman de 0.992 y 0.985, respectivamente. Por tanto, la estabilización de la respuesta hidrológica simulada comenzó a partir de un nivel intermedio de discretización, aunque sin seguir una reducción monotónica de las diferencias. Esta conclusión se limita a las tolerancias internas adoptadas diferencias menores o iguales a 15 % y correlaciones mayores o iguales a 0.90, a la referencia interna de 153 URHs y a los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018; en consecuencia, no representa un umbral universal de discretización ni una validación del comportamiento hidrológico real de la cuenca.

5.2. Contribuciones al manejo de recursos hídricos en la cuenca del río Huaura

La presente investigación aporta evidencia metodológica para el modelamiento hidrológico semidistribuido de la cuenca del río Huaura, al mostrar cómo el nivel de discretización espacial mediante Unidades de Respuesta Hidrológica influye en los resultados simulados bajo los datos, métodos, parámetros y periodos evaluados. Los hallazgos permiten analizar conjuntamente el nivel de detalle espacial, la estabilidad interna de los resultados, la disponibilidad de información y la complejidad del modelo. Sin embargo, no establecen por sí solos un criterio de validez general para seleccionar el número de URHs en estudios destinados

al diseño de infraestructura o a la gestión operativa del recurso hídrico.

Desde el enfoque del manejo de recursos hídricos, los caudales naturales diarios simulados constituyen un antecedente metodológico para analizar la sensibilidad de la respuesta hidrológica frente a diferentes niveles de discretización espacial. Los resultados pueden orientar futuras configuraciones de modelamiento y estudios posteriores de la cuenca. Sin embargo, su utilización directa para determinar disponibilidad hídrica, asignación del recurso o diseño de infraestructura requeriría incorporar explícitamente las operaciones hidráulicas existentes y realizar procesos de calibración y validación con información hidrométrica representativa del régimen natural o previamente naturalizada.

Asimismo, la investigación contribuye a mejorar la interpretación de los resultados hidrológicos cuando se dispone de estaciones de aforo que podrían estar influenciadas por regulación hidráulica. En el caso de la estación Sayán, la tesis plantea un enfoque metodológico prudente, al utilizar dicha información como referencia hidrométrica complementaria y no como criterio de calibración o validación estricta. Esta decisión permite evitar interpretaciones erróneas cuando la serie observada no representa necesariamente una condición natural no regulada.

Otro aporte de la investigación consiste en la identificación de una zona de estabilización a partir de 17 URHs y en el reconocimiento del escenario de 65 URHs como la configuración de menor discretización con mayor cercanía general respecto de la referencia interna de 153 URHs. Este resultado muestra que, dentro de los métodos, parámetros y periodos evaluados, una configuración con menor número de unidades puede mantener una alta similitud estadística y temporal con el escenario de mayor detalle espacial. No obstante, esta similitud interna no permite afirmar que 65 URHs sea la configuración óptima o más precisa para representar la respuesta hidrológica real de la cuenca.

En conjunto, la investigación proporciona una base metodológica preliminar para futuras evaluaciones de la discretización espacial en la cuenca del río Huaura. Su contribución se circunscribe a la comparación interna de las configuraciones del modelo y a la identificación de una zona de estabilización bajo las condiciones analizadas. Por tanto, los resultados pueden orientar el planteamiento de estudios posteriores, pero no constituyen evidencia suficiente para fundamentar directamente decisiones de gestión hídrica, planificación territorial, asignación de agua, diseño de infraestructura u operación de sistemas hidráulicos.

5.3. Limitaciones de la investigación

La investigación no incluyó un registro sistemático del tiempo de ejecución, tamaño de los archivos de proyecto, número total de elementos hidrológicos ni recursos computacionales requeridos por cada escenario de discretización. En consecuencia, las diferencias de complejidad entre los escenarios se interpretaron únicamente en función del número de URHs y del nivel de detalle espacial, sin evaluar cuantitativamente su eficiencia computacional

Una de las principales limitaciones de la investigación estuvo relacionada con la información hidrométrica disponible en la estación de aforo Sayán. Si bien esta estación permitió contar con una referencia observada para contrastar la magnitud y el comportamiento temporal de los caudales simulados, sus registros pueden estar influenciados por regulación hidráulica aguas arriba. Por esta razón, no fue posible asumir dicha serie como una representación directa del régimen natural de la cuenca ni emplearla como base para una calibración o validación estricta del modelo.

Otra limitación estuvo asociada a la ausencia de información operativa completa sobre infraestructura hidráulica ubicada aguas arriba de la estación Sayán. No se contó con datos suficientes sobre almacenamiento inicial y final, reglas de operación, descargas reguladas, derivaciones, retornos o variaciones temporales de embalses que permitieran reconstruir de

manera detallada el régimen natural del caudal observado. Esta condición limitó la posibilidad de naturalizar la serie hidrométrica o incorporar explícitamente dichos elementos como componentes hidráulicos dentro del modelo HEC-HMS.

La investigación no permitió atribuir de manera exclusiva las diferencias entre los caudales observados y simulados a la regulación hidráulica aguas arriba. Aunque esta constituye una hipótesis relevante, no se contó con información operativa suficiente para cuantificar su efecto. Asimismo, las discrepancias pueden estar asociadas a la incertidumbre de la precipitación espacialmente distribuida, los valores de Número de Curva, la representación del flujo base, el tránsito de caudales, la escala temporal empleada, los parámetros no calibrados y la representatividad de la serie hidrométrica. Al no haberse realizado un análisis de incertidumbre que separara estos efectos, su contribución relativa no pudo ser determinada.

Asimismo, los resultados dependieron de la calidad, resolución y representatividad de los datos de entrada, entre ellos las series de precipitación, el modelo digital de elevaciones, la información de uso y cobertura del suelo y los valores de Número de Curva. También estuvieron condicionados por los parámetros del tiempo de retardo, flujo base y tránsito de caudales, los cuales fueron estimados o adoptados procurando mantener coherencia física y homogeneidad entre escenarios, pero no fueron calibrados individualmente frente a una serie hidrométrica naturalizada. No se realizó un análisis independiente de sensibilidad o propagación de incertidumbres para estos parámetros. Por ello, aunque la configuración homogénea fortaleció la comparabilidad entre escenarios, no fue posible cuantificar qué proporción de las diferencias simuladas correspondió exclusivamente a la discretización espacial y qué proporción estuvo asociada a los insumos y parámetros del modelo

El escenario de 153 URHs fue utilizado exclusivamente como referencia interna por ser la configuración de mayor discretización espacial dentro de los siete escenarios evaluados. Esta

selección permitió establecer una base común para calcular las diferencias relativas, el sesgo y la similitud interescenario; sin embargo, no implica que dicha configuración represente una solución exacta, una observación del régimen natural o un nivel de discretización completamente convergente. En consecuencia, las métricas obtenidas expresan cercanía respecto de una referencia interna y no exactitud hidrológica frente al comportamiento real de la cuenca.

La limitación metodológica está relacionada con la aplicación del método de pérdidas SCS-CN durante periodos continuos comprendidos entre enero y mayo. La documentación de HEC-HMS establece que este método está concebido principalmente para simulaciones por evento, debido a que no representa de manera continua la recuperación de la capacidad de almacenamiento del suelo entre precipitaciones. Esta condición puede influir en la magnitud absoluta de los volúmenes y caudales generados durante periodos prolongados. No obstante, el método, sus parámetros y la configuración temporal se mantuvieron sin variación en todos los escenarios; por ello, los resultados fueron interpretados exclusivamente como una comparación interna de la sensibilidad de la respuesta simulada frente al número de URHs y no como una reproducción calibrada del régimen natural real.

El alcance temporal estuvo limitado a los periodos comprendidos entre el 1 de enero y el 31 de mayo de 2016, 2017 y 2018, equivalentes a 152, 151 y 151 días, respectivamente. Por tanto, la investigación no evaluó años hidrológicos completos, estaciones secas posteriores al mes de mayo, secuencias multianuales más extensas ni una diversidad amplia de condiciones hidrometeorológicas. En consecuencia, la estabilización identificada podría variar al incorporar otros años, periodos secos, periodos húmedos o eventos extremos diferentes de los analizados.

Las simulaciones se ejecutaron con un intervalo computacional de un minuto; sin embargo, las series de precipitación utilizadas tuvieron resolución diaria y los resultados fueron

posteriormente integrados y analizados a escala diaria. En consecuencia, los caudales máximos reportados corresponden a valores diarios obtenidos a partir de la simulación y no a caudales máximos instantáneos observados. Esta resolución limita el análisis de variaciones subdiarias, tiempos precisos de ocurrencia de los picos y respuestas hidrológicas de corta duración, por lo que los resultados no deben emplearse para caracterizar directamente caudales instantáneos de diseño.

La estimación del tiempo de concentración se realizó mediante una aplicación operacional de la ecuación de Bransby-Williams, utilizando la pendiente media de la subcuenca calculada por HEC-HMS en lugar de la pendiente equivalente del cauce principal. Si bien este criterio fue aplicado uniformemente en todas las URHs, introduce incertidumbre en la magnitud absoluta del tiempo de concentración, especialmente en las unidades de menor extensión. En consecuencia, los valores fueron utilizados principalmente para mantener una parametrización comparable entre escenarios y evaluar la influencia relativa de la discretización espacial.

Finalmente, el análisis se centró en la comparación de escenarios de discretización espacial dentro de un modelo hidrológico semidistribuido. Por ello, los resultados permiten evaluar la sensibilidad de los caudales naturales diarios simulados frente al número de URHs, pero no sustituyen estudios hidráulicos detallados orientados a analizar niveles de agua, velocidades, zonas de inundación o interacción con infraestructura hidráulica.

5.4. Recomendaciones para futuras investigaciones

Se recomienda ampliar el alcance temporal mediante la simulación de años hidrológicos completos, incorporando explícitamente temporadas húmedas y secas, años con diferente comportamiento hidrometeorológico y eventos extremos. Los nuevos periodos deberán incluir meses y años independientes de enero-mayo de 2016, 2017 y 2018. Para verificar la persistencia de los resultados, las métricas de distancia, sesgo, volumen, caudal máximo y correlación

deberán calcularse separadamente para cada año y temporada, comprobando si el inicio de la estabilización se mantiene bajo condiciones diferentes de las evaluadas en esta investigación.

Se recomienda recopilar e incorporar información operativa de la infraestructura hidráulica ubicada aguas arriba de Sayán, incluyendo curvas de almacenamiento, niveles, volúmenes iniciales y finales, descargas reguladas, derivaciones, retornos y reglas de operación de los reservorios. Esta información deberá utilizarse para representar explícitamente la regulación dentro del modelo o para reconstruir una serie hidrométrica naturalizada. La incorporación de estas operaciones deberá verificarse mediante balances de masa y mediante la comparación documentada entre los caudales observados regulados, los caudales naturalizados y los caudales simulados.

Se recomienda realizar procesos diferenciados de calibración y validación hidrométrica una vez que se disponga de series representativas del régimen natural o previamente naturalizadas. La calibración deberá efectuarse con un conjunto de años o estaciones, mientras que la validación deberá utilizar información independiente que no haya intervenido en el ajuste de los parámetros. Los criterios de desempeño deberán establecerse antes del proceso de calibración y los parámetros deberán mantenerse sin modificaciones durante la validación. La verificación deberá presentar por separado los periodos utilizados, los valores de los parámetros y las métricas de desempeño obtenidas en ambas etapas.

Se recomienda desarrollar un análisis de sensibilidad e incertidumbre de los principales datos y parámetros del modelo, incluyendo el Número de Curva, el tiempo de retardo, los parámetros del método Recession, los coeficientes de Muskingum y la distribución espacial de la precipitación. Los rangos evaluados deberán sustentarse en información física, bibliográfica o de campo. La verificación deberá incluir una clasificación de los parámetros según su influencia, intervalos de incertidumbre para los caudales y volúmenes simulados y una

estimación de la contribución relativa de la incertidumbre paramétrica frente al efecto producido por el número de URHs.

Se recomienda evaluar la sensibilidad de los resultados frente a la resolución de los datos de entrada, el intervalo computacional y la escala de procesamiento de los caudales. Cuando se disponga de precipitación y caudal subdiarios, deberán probarse intervalos temporales compatibles con la resolución de dichas series, evitando atribuir precisión subdiaria a entradas exclusivamente diarias. La verificación deberá comparar el efecto de los intervalos seleccionados sobre los caudales máximos, volúmenes, tiempos de ocurrencia de los picos y valores diarios integrados, documentando si los resultados alcanzan estabilidad temporal al reducir progresivamente el intervalo computacional.

Se recomienda documentar explícitamente el anidamiento espacial y el costo computacional de cada escenario de discretización. La documentación deberá identificar la correspondencia entre las URHs de escenarios sucesivos, conservar el mismo límite de cuenca y punto de salida, comprobar la conservación del área tributaria y registrar los cambios de la red de drenaje. Asimismo, se deberán evaluar configuraciones adicionales o de mayor detalle que 153 URHs para comprobar si la estabilización persiste sin asumir que el escenario actualmente utilizado como referencia interna representa una solución convergente definitiva. Para cada configuración deberán registrarse el número total de elementos y parámetros, el tamaño de los archivos, el tiempo de ejecución, el uso de memoria y las características del equipo empleado. La verificación deberá incluir una matriz de anidamiento y una comparación entre similitud hidrológica y costo computacional.

Se recomienda evaluar la integración con modelos hidráulicos especializados únicamente después de representar las operaciones hidráulicas existentes y completar procesos independientes de calibración y validación hidrológica. Bajo esas condiciones, los caudales

simulados podrían emplearse como condiciones de entrada para analizar niveles de agua, velocidades, zonas inundables e interacción con infraestructura. La verificación deberá documentar las condiciones de frontera utilizadas y contrastar los resultados hidráulicos con información observada disponible. Esta recomendación no implica utilizar directamente los caudales obtenidos en la presente investigación para diseño de obras o decisiones operativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology, 87*(1–2), 45–59. https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9

Aguirre Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual REDESMA, 5*(1), 1–5.

Almeida-Ñauñay, A. F., Sanz, E., Berlanga, A., Patricio, M. Á., Molina, J. M., & Zubelzu, S. (2025). Development of open-source tools for event-based hydrological modelling using GIS and Python. *Water, 17*(14), Artículo 2160. https://doi.org/10.3390/w17142160

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73–89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Arrieta-Pastrana, A., Coronado-Hernández, O. E., & Coronado-Hernández, J. R. (2024). Explicit scheme for a hydrological channel routing: Mathematical model and practical application. *Water, 16*(11), Artículo 1480. https://doi.org/10.3390/w16111480

ASF DAAC. (2014). ALOS PALSAR high resolution radiometric terrain corrected product [Conjunto de datos]. NASA Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA

Atkins, J. T., Wiley, J. B., & Paybins, K. S. (2005). *Calibration parameters used to simulate streamflow from application of the Hydrologic Simulation Program-FORTRA*N *Model* (*HSPF*) *to mountainous basins containing coal mines in West Virginia* (Scientific Investigations Report 2005-5099). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/sir20055099

Barbosa, J., Fernandes, A., Lima, A., & Assis, L. (2019). The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: A case study. *International Journal of Hydrology, 3*(5), 442–449. https://doi.org/10.15406/ijh.2019.03.00209

Beven, K. (2012). Rainfall-runoff modelling: The primer (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119951001

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.

Cipriano Bautista, J. G. (2024). Pronóstico del caudal de la cuenca del río Huaura mediante un sistema de inferencia difuso, basado en precipitaciones [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional UNS.

Dingman, S. L. (2015). Physical hydrology (3rd ed.). Waveland Press.

El-Bagoury, H., & Gad, A. (2024). Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS. *Water, 16*(2), Artículo 356. https://doi.org/10.3390/w16020356

Geo GPS Perú. (2019). Número de curva: descargar mapa shapefile gratis. https://www.geogpsperu.com/2019/04/numero-de-curva-descargar-mapa.html

Geo GPS Perú. (2023). Uso actual de suelos/tierras: cobertura en shapefile gratis ArcGIS-QGIS. https://www.geogpsperu.com/2023/03/uso-actual-de-suelos-tierras-cobertura.html

Gomariz Castillo, F., & Alonso Sarría, F. (2018). Effect of watershed subdivision and estimation of climatic variables on hydrological simulation with the SWAT model in semi-arid Mediterranean basins. *Papeles de Geografía, 64*, 114–133. https://doi.org/10.6018/geografia/2018/331531

Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A., & Namara, W. G. (2023). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, Rift Valley Basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences, 197*, Artículo 104743. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104743

Guduru, J. U., & Mohammed, A. S. (2024). Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges, 17*, Artículo 101017. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology, 377*(1–2), 80–91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Healy, R. W., Winter, T. C., LaBaugh, J. W., & Franke, O. L. (2007). *Water budgets: Foundations for effective water-resources and environmental management* (Circular 1308). U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1308/

Jha, M., Gassman, P. W., Secchi, S., Gu, R., & Arnold, J. G. (2004). Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association, 40*(3), 811–825. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb04460.x

Kastali, A., Zeroual, A., Zeroual, S., & Hamitouche, Y. (2022). Auto-calibration of HEC-HMS model for historic flood event under rating curve uncertainty: Case study, Allala Watershed, Algeria. *KSCE Journal of Civil Engineering, 26*(1), 482–493. https://doi.org/10.1007/s12205-021-1051-4

Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences, 5*, 89–97. https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005

Legates, D. R., & McCabe, G. J., Jr. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research, 35*(1), 233–241. https://doi.org/10.1029/1998WR900018

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1982). Hydrology for engineers (3rd ed.). McGraw-Hill.

López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., & Gimena, F. N. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona. *Obras y Proyectos, 12*, 15–30.

Manikanta, V., & Umamahesh, N. V. (2023). Performance assessment of methods to estimate initial hydrologic conditions for event-based rainfall-runoff modelling. *Journal of Water and Climate Change, 14*(7), 2277–2293. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.043

Mao, B., Wang, X., Jia, S., & Liu, Z. (2024). Multi-methods to investigate the baseflow: Insight from watershed scale spatiotemporal variety perspective. *Ecological Indicators, 158*, Artículo 111533. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111533

Markstrom, S. L., Regan, R. S., Hay, L. E., Viger, R. J., Webb, R. M. T., Payn, R. A., & LaFontaine, J. H. (2015). PRMS-IV, the precipitation-runoff modeling system, version 4 (Techniques and Methods 6-B7). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/tm6B7

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE, 58*(6), 1763–1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Nash, J. E., & SuTcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10*(3), 282–290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

Natural Resources Conservation Service. (2004). *Estimation of direct runoff from storm rainfall* (National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 10). U.S. Department of Agriculture.

Natural Resources Conservation Service. (2007). *Hydrographs* (National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 16). U.S. Department of Agriculture.

Onyutha, C. (2024). Pros and cons of various efficiency criteria for hydrological model performance evaluation. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 385*, 181–187. https://doi.org/10.5194/piahs-385-181-2024

Orellana Cabello, R. E. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS* [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. http://hdl.handle.net/20.500.12404/18304

Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London, 58*, 240–242. https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041

Poblete, D., Arevalo, J., Nicolis, O., & Figueroa, F. (2020). Optimization of hydrologic response units (HRUs) using gridded meteorological data and spatially varying parameters. *Water, 12*(12), Artículo 3558. https://doi.org/10.3390/w12123558

Puche, M., Troin, M., Fox, D., & Royer-Gaspard, P. (2025). Optimizing spatial discretization according to input data in the Soil and Water Assessment Tool: A case study in a coastal Mediterranean watershed. *Water, 17*(2), Artículo 239. https://doi.org/10.3390/w17020239

Raffensperger, J. P., Baker, A. C., Blomquist, J. D., & Hopple, J. A. (2017). Optimal hydrograph separation using a recursive digital filter constrained by chemical mass balance, with application to selected Chesapeake Bay watersheds (Scientific Investigations Report 2017–5034). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/sir20175034

Savvidou, E., Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koukouvinos, A., & Skarlatos, D. (2018). The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units. Water, 10(2), Artículo 194. https://doi.org/10.3390/w10020194

Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia, 126*(5), 1763–1768. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology, 15*(1), 72–101. https://doi.org/10.2307/1412159

Steinmetz, A. A., Beskow, S., Terra, F. da S., Nunes, M. C. M., Vargas, M. M., & Horn, J. F. C. (2019). Spatial discretization influence on flood modeling using unit hydrograph theory. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 24*, Artículo e46. https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180143

U.S. Army Corps of Engineers. (2026). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS user's manual: Version 4.13*. Hydrologic Engineering Center.

U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). *Mechanistic modeling: Configuration & calibration*. N-STEPS Online. https://www.epa.gov/n-steps-online/mechanistic-modeling-configuration-calibration

Vásquez Villanueva, A., Mejía Marcacuzco, A., Faustino Manco, J., Terán Adriazola, R., Vásquez Romero, I., Díaz Rimarachín, J., Vásquez Romero, C., Castro Abanto, A., Tapia Muñoz, M., & Alcántara Ramos, J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research, 30*(1), 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Yupanqui Silva, R. A. (2023). *Modelación hidrológica por eventos extremos en la parte alta de la cuenca Chancay-Lambayeque hasta la estación Puente San Carlos utilizando el modelo HEC-HMS* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. http://hdl.handle.net/10757/672125

Zhu, L.-J., Qin, C.-Z., Zhu, A.-X., Liu, J., & Wu, H. (2019). Effects of different spatial configuration units for the spatial optimization of watershed best management practice scenarios. Water, 11(2), Artículo 262. https://doi.org/10.3390/w11020262

ANEXOS

Anexo A. Información hidrometeorológica utilizada

El presente anexo reúne la información hidrometeorológica complementaria empleada en el desarrollo del modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huaura. Se presentan las características de las estaciones consideradas, la disponibilidad de registros diarios, los acumulados mensuales de precipitación y el resumen hidrométrico de la estación Sayán, utilizada como referencia complementaria para el contraste de los caudales simulados.

Tabla A1

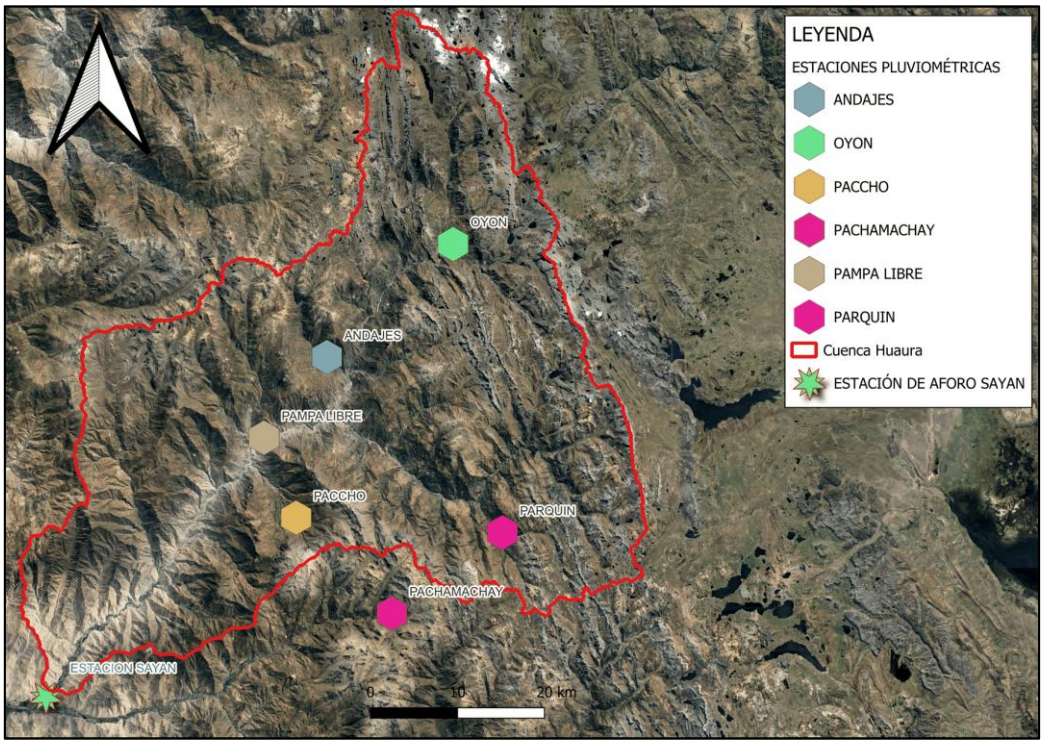
Características de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en la investigación

Estación	Código (SENAMHI)	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	Variable	Periodo
Andajes	155201	Pluviométrica	292220.74	8807301.76	3950	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Oyón	000541	Pluviométrica	306730.01	8820294.52	3667	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Paccho	155200	Pluviométrica	288692.09	8788840.86	3250	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Pachamachay	155207	Pluviométrica	299691.40	8777846.82	3175	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Pampa Libre	155107	Pluviométrica	284988.13	8798036.52	1756	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Parquín	155212	Pluviométrica	312387.30	8787140.63	3571	Precipitación	Ene.-may. 2016-2018
Sayán	4724966C	Hidrométrica	259914.99	8768236.93	645	Caudal	Ene.-may. 2016-2018

Nota. Elaboración propia a partir de la información hidrometeorológica utilizada en la investigación. Las coordenadas se presentan en el sistema WGS 84 / UTM zona 18S.

Figura A1

Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas en la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir de la ubicación espacial de las estaciones hidrometeorológicas empleadas en la investigación. Sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S.

Tabla A2

Disponibilidad de registros diarios por estación durante los periodos de simulación

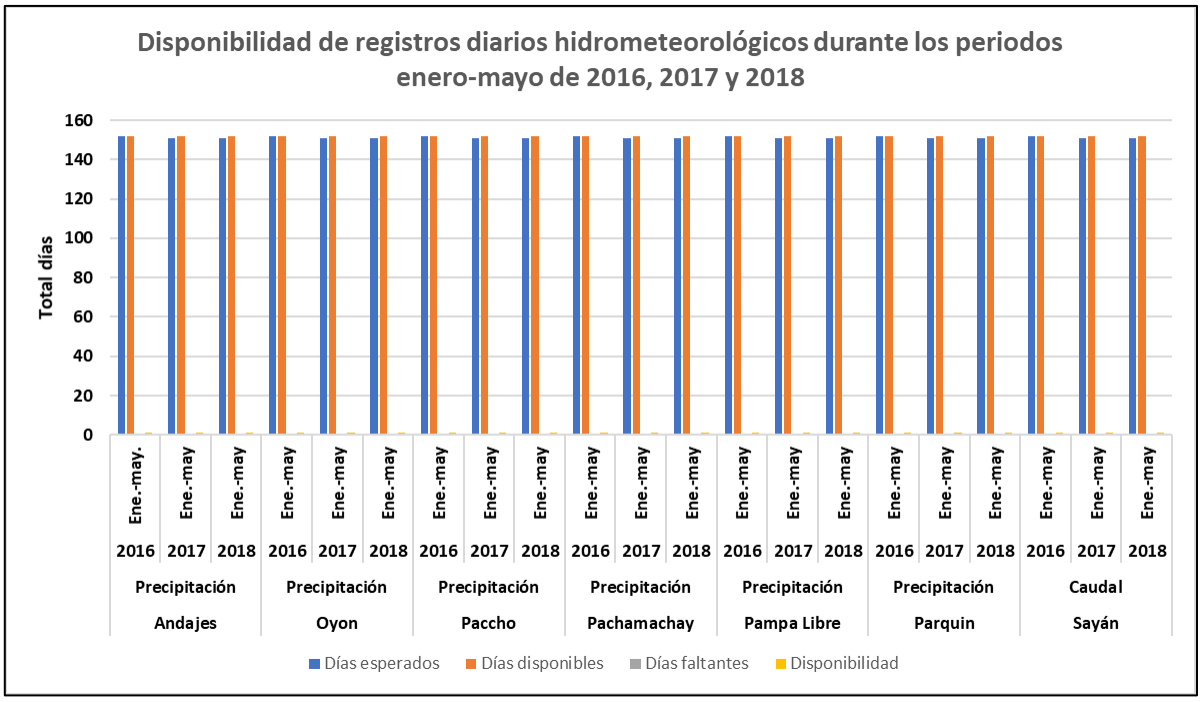
Estación	Variable	Año	Periodo	Días esperados	Días disponibles	Días faltantes	Disponibilidad
Andajes	Precipitación	2016	Ene.-may.	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Oyón	Precipitación	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Paccho	Precipitación	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Pachamachay	Precipitación	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %

Estación	Variable	Año	Periodo	Días esperados	Días disponibles	Días faltantes	Disponibilidad
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Pampa Libre	Precipitación	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Parquín	Precipitación	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %
Sayán	Caudal	2016	Ene.-may	152	152	0	100 %
		2017	Ene.-may	151	151	0	100 %
		2018	Ene.-may	151	151	0	100 %

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión de disponibilidad de los registros diarios hidrometeorológicos. Para el periodo enero-mayo, el año 2016 considera 152 días por ser año bisiesto, mientras que los años 2017 y 2018 consideran 151 días.

Figura A2

Disponibilidad de registros diarios hidrometeorológicos durante los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018



Nota. Elaboración propia a partir del control de disponibilidad de los registros diarios empleados en la investigación.

Tabla A3

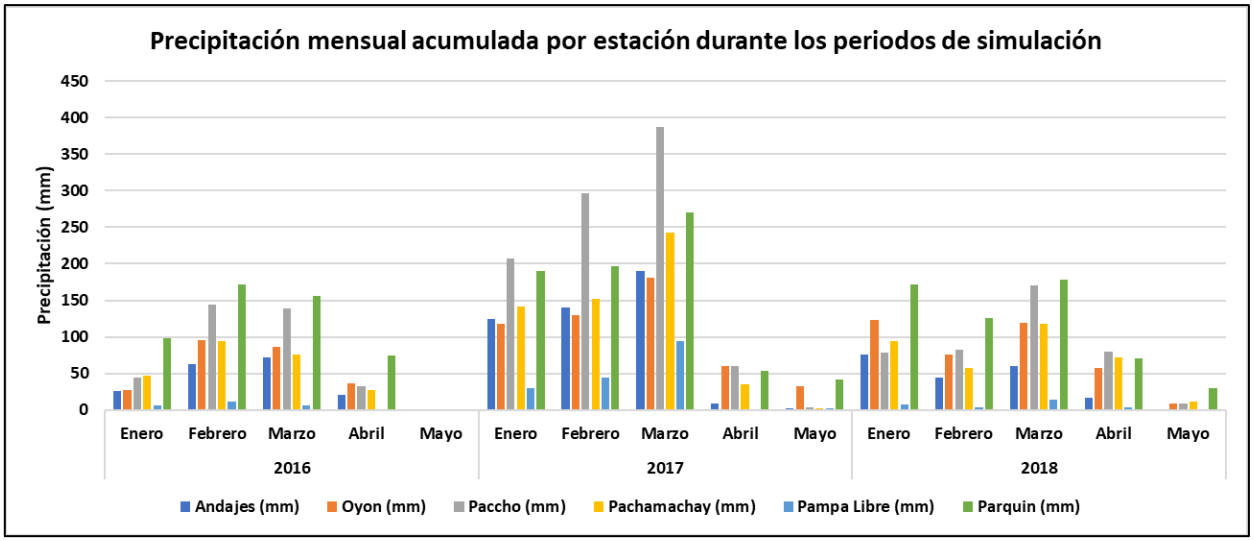
Precipitación mensual acumulada por estación durante los periodos de simulación

Año	Mes	Andajes (mm)	Oyón (mm)	Paccho (mm)	Pachamachay (mm)	Pampa Libre (mm)	Parquín (mm)
2016	Enero	25.7	26.7	44.7	46.8	6.1	98.1
	Febrero	63.3	95.7	144.6	94.2	11.8	172
	Marzo	71.3	86.8	139.3	75.5	6.1	156.5
	Abril	20.3	36	33.1	26.8	0.4	74.1
	Mayo	0	1.1	0	0	0	1.5
2017	Enero	123.8	117.7	206.9	141.9	29.3	190.1
	Febrero	140	129.4	296.6	151.8	44.7	197.3
	Marzo	190.7	180.3	387.7	242.8	94.7	269.6
	Abril	9	60.5	60.3	35.4	0.8	53.4
	Mayo	2	32.6	3.8	2.8	2	41.5
2018	Enero	75.5	123.5	78.2	94.1	7.6	172.3
	Febrero	44.5	75.9	82.2	57.7	3.6	126.3
	Marzo	60.7	119.6	170.5	117.4	14.1	177.9
	Abril	16.6	56.8	80.1	72.3	3.8	70
	Mayo	0	8.6	9.2	11.6	0	29.6

Nota. Elaboración propia a partir de los registros diarios de precipitación utilizados en la investigación. Los valores corresponden a la precipitación acumulada mensual, expresada en milímetros, para las estaciones Andajes, Oyón, Paccho, Pachamachay, Pampa Libre y Parquín durante los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018.

Figura A3

Precipitación mensual acumulada por estación durante los periodos de simulación



Nota. Elaboración propia a partir de los registros diarios de precipitación utilizados en la investigación.

Tabla A4

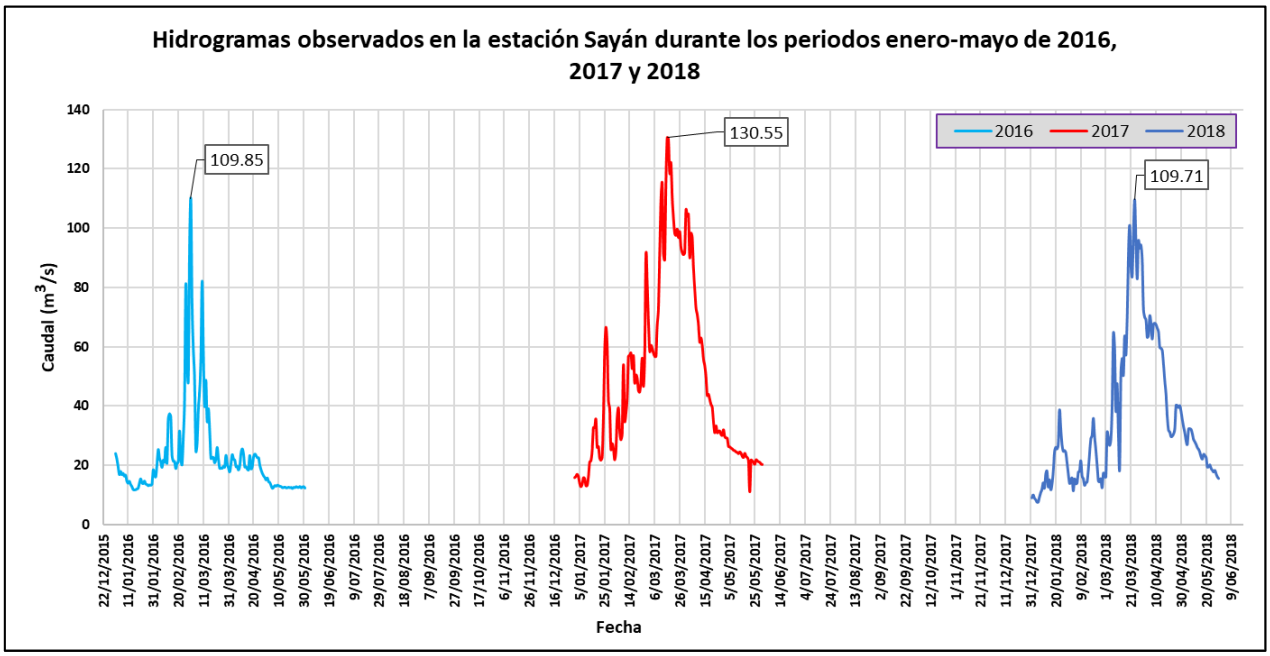
Resumen hidrométrico de la estación Sayán durante los periodos de análisis

Año	Periodo	Caudal medio (m^3/s)	Mediana (m^3/s)	Caudal mínimo (m^3/s)	Caudal máximo (m^3/s)	Volumen observado (hm^3)
2016	Ene.-may.	23.03	19.16	11.63	109.85	300.89
2017	Ene.-may.	49.03	38.99	10.97	130.55	638.15
2018	Ene.-may.	35.45	27.09	7.55	109.71	458.39

Nota. Elaboración propia a partir de los registros diarios de caudal de la estación Sayán. Esta información fue empleada como referencia hidrométrica complementaria y no como serie natural no regulada para calibración o validación estricta. El volumen observado fue calculado mediante la sumatoria de caudales diarios multiplicada por 86 400 segundos y convertida a hectómetros cúbicos.

Figura A4

Hidrogramas observados en la estación Sayán durante los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018



Nota. Elaboración propia a partir de los registros diarios de caudal de la estación Sayán.

Tabla A5

Resumen del control estadístico y verificación de las series de precipitación utilizadas en HEC-HMS

Estación	Registros analizados	Registros con P > 0	Límite superior IQR (mm)	Candidatos para revisión	Diferencias originales HEC-HMS	Tratamiento
Andajes	454	146	16.75	2	0	Se conservó la serie original
Oyón	454	257	12.90	13	0	Se conservó la serie original
Paccho	454	240	21.94	9	0	Se conservó la serie original
Pachamachay	454	278	14.15	9	0	Se conservó la serie original
Pampa Libre	454	110	7.08	2	0	Se conservó la serie original
Parquín	454	303	18.55	12	0	Se conservó la serie original

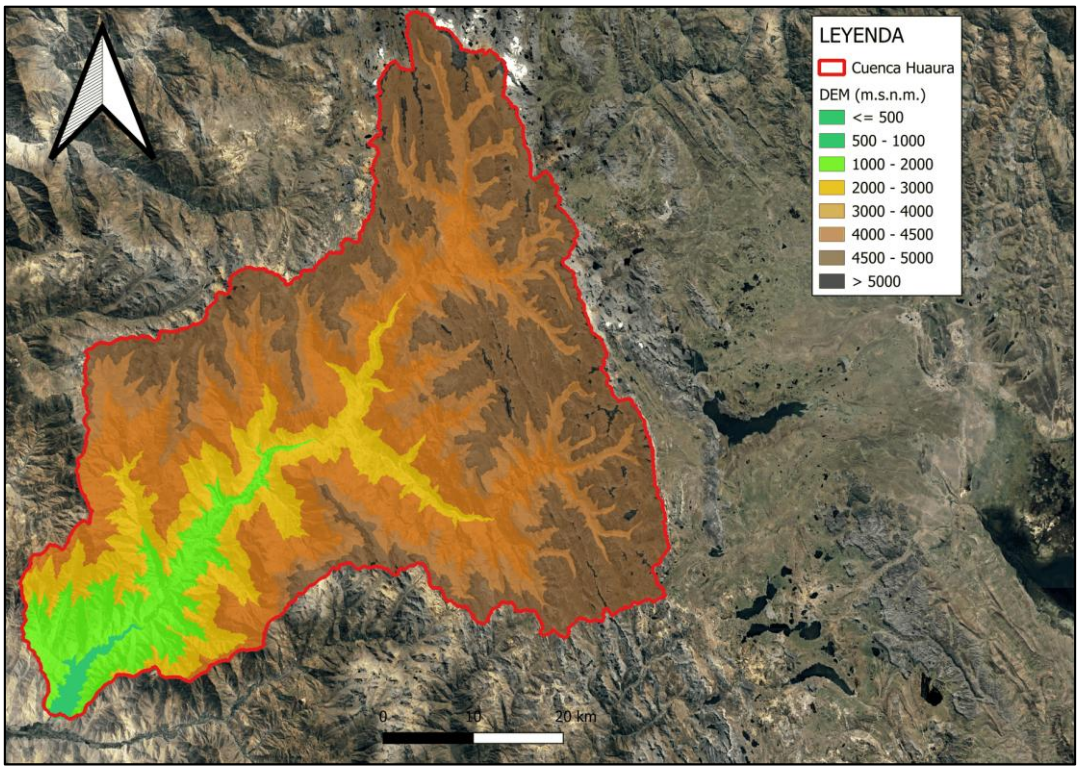
Nota. El análisis comprendió exclusivamente los periodos enero-mayo de 2016, 2017 y 2018. Los límites intercuartílicos fueron calculados con los registros de precipitación mayores que cero.

Anexo B. Procesamiento geoespacial de la cuenca

El presente anexo reúne la información complementaria asociada al procesamiento geoespacial de la cuenca del río Huaura. Se presentan los principales insumos espaciales empleados para la caracterización física e hidrológica de la cuenca, incluyendo el Modelo Digital de Elevaciones, la pendiente, el uso y cobertura del suelo y el Número de Curva. Asimismo, se incorporan tablas de resumen espacial que permiten evidenciar la distribución de áreas por rangos de elevación, pendiente, cobertura y condición hidrológica, las cuales sirvieron como base para la generación de escenarios de discretización espacial en URHs.

Figura B1

Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir del archivo de elevación asociado al producto ALOS PALSAR High Resolution Radiometric Terrain Corrected, de 12.5 m de resolución espacial, distribuido por ASF DAAC (2014).

Tabla B1

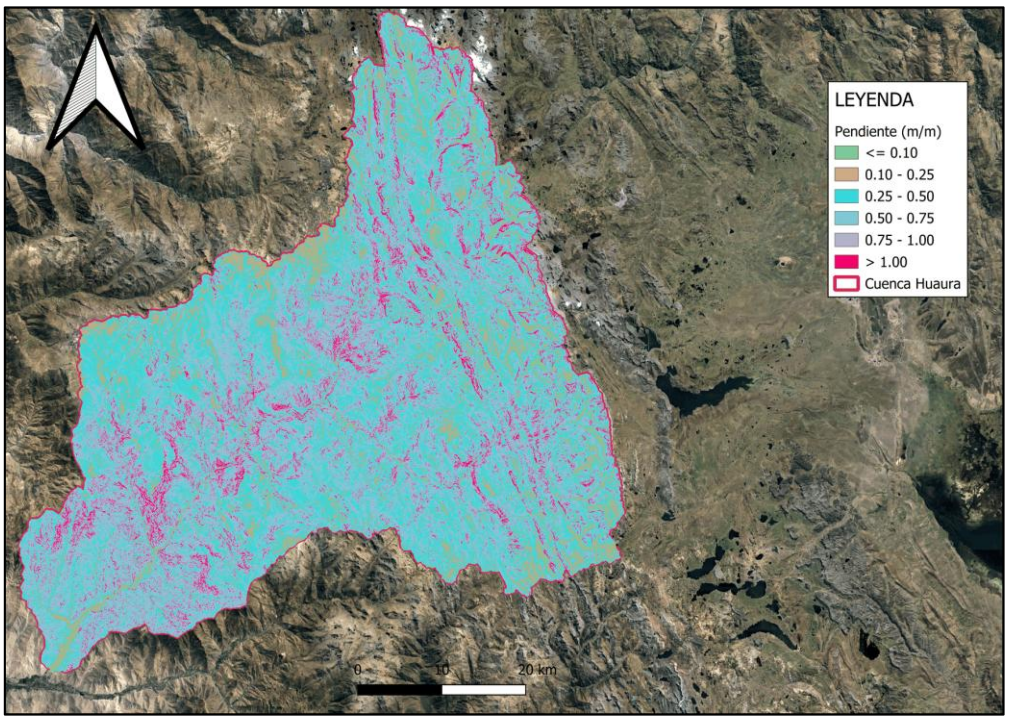
Distribución de áreas por rangos de elevación en la cuenca del río Huaura

Rango de elevación (m s. n. m.)	Área (km²)	Porcentaje del área total (%)
≤ 500	0.00	0 %
500–1000	21.26	1 %
1000–2000	219.10	8 %
2000–3000	367.84	13 %
3000–4000	668.82	24 %
4000–4500	552.66	19 %
4500–5000	970.60	34 %
> 5000	40.96	1 %
Total	2,841.23	100 %

Nota. Elaboración propia a partir de la reclasificación del modelo digital de elevaciones DEM.elevation.tif utilizado en el procesamiento geoespacial de la cuenca del río Huaura. El insumo corresponde a un archivo ráster en formato GeoTIFF, con un tamaño de píxel de 12.5 m y sistema de referencia horizontal WGS 84 / UTM zona 18S (EPSG:32718). Los valores de elevación del ráster se encuentran comprendidos entre 680 y 5,603 m.

Figura B2

Mapa de pendientes de la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir del cálculo de pendientes derivado del Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca.

Tabla B2

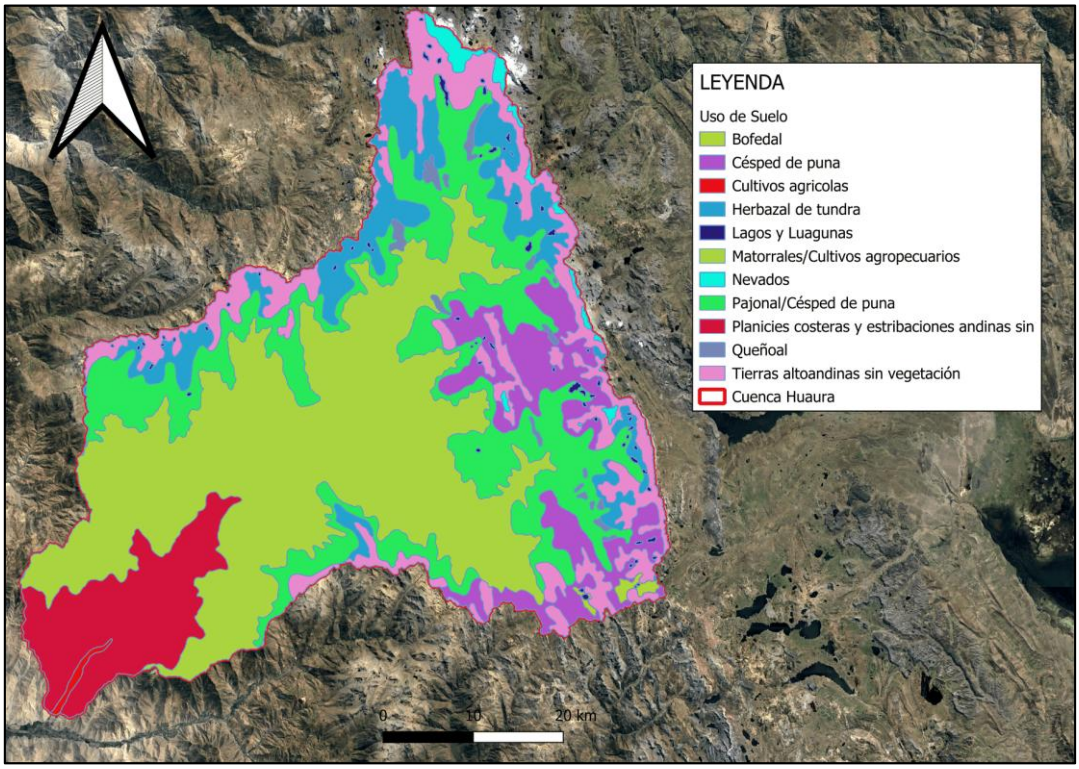
Distribución de áreas por rangos de pendiente en la cuenca del río Huaura

Rango de pendiente (m/m)	Área (km²)	Porcentaje del área total (%)	Interpretación hidrológica
≤ 0.10	76.79	3 %	Pendiente baja
0.10–0.25	298.55	11 %	Pendiente moderada
0.25–0.50	916.96	32 %	Pendiente media a alta
0.50–0.75	942.58	33 %	Pendiente alta
0.75–1.00	425.18	15 %	Pendiente muy alta
> 1.00	182.55	6 %	Pendiente extremadamente alta
Total	2,841.23	100 %	

Nota. Elaboración propia a partir del mapa de pendientes derivado del Modelo Digital de Elevaciones.

Figura B3

Uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento de la información cartográfica de uso y cobertura del suelo empleada para la caracterización hidrológica de la cuenca.

Tabla B3

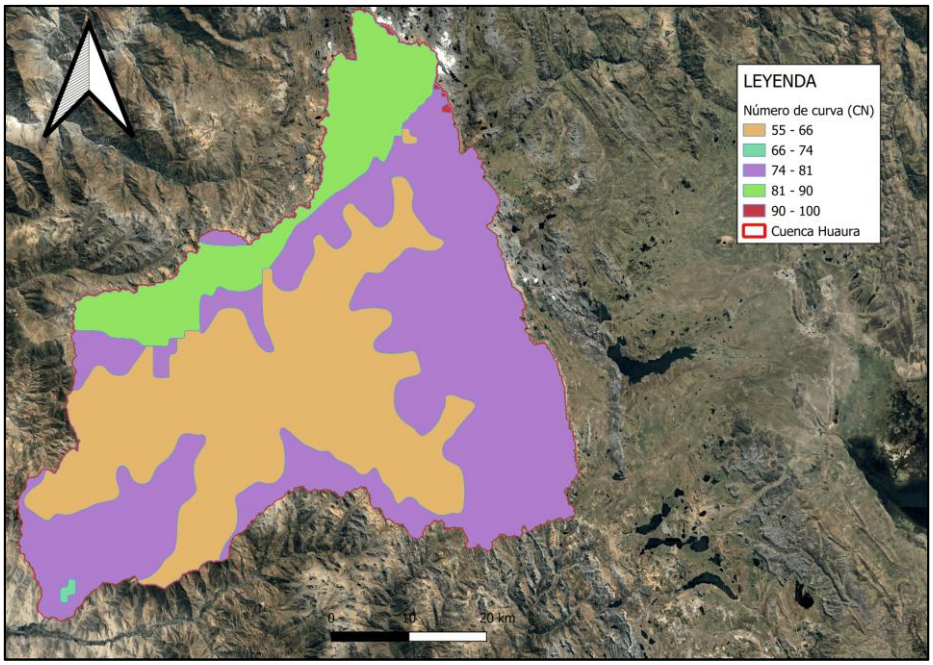
Distribución de áreas por uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Huaura

Uso y cobertura del suelo	Área (km^2)	Porcentaje del área total (%)
Bofedal	1,122.83	40 %
Césped de puna	219.37	8 %
Cultivos agrícolas	6.71	0.2 %
Herbazal de tundra	608.53	21 %
Lagos y lagunas	9.25	0.3 %
Matorrales/cultivos agropecuarios	224.56	8 %
Nevados	253.39	9 %
Pajonal/césped de puna	23.85	1 %
Planicies costeras y estribaciones andinas	27.00	1 %
Queñoal	323.93	11 %
Tierras altoandinas sin vegetación	15.11	1 %
Total	2,841.23	100 %

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento de la capa de uso y cobertura del suelo de la cuenca del río Huaura.

Figura B4

Número de Curva de la cuenca del río Huaura



Nota. Elaboración propia a partir de la reclasificación hidrológica del uso y cobertura del suelo y los criterios del método SCS-CN.

Tabla B4

Distribución de áreas por rango de Número de Curva en la cuenca del río Huaura

Rango de CN	Área (km²)	Porcentaje del área total (%)	Punto medio	Valor adoptado
55-66	1,105.29	39 %	60.5	61
66-74	4.00	0.1 %	70.0	70
74-81	1,335.69	47 %	77.5	78
81-90	385.84	14 %	85.5	86
90-100	3.69	0.1 %	95.0	95
Total	2,841.23	100 %		

Nota. Los valores adoptados fueron utilizados para calcular el CN compuesto ponderado por área de cada URH. Posteriormente, cada CN compuesto fue multiplicado por el factor uniforme 0.92. Elaboración propia a partir de la capa inicial de Número de Curva obtenida de Geo GPS Perú (2019).

Tabla B5

Resumen de insumos geoespaciales empleados en el procesamiento hidrológico de la cuenca

Insumo geoespacial	Fuente u origen	Producto utilizado o derivado	Uso dentro de la investigación
Modelo Digital de Elevaciones	Producto ALOS PALSAR de alta resolución, distribuido por Alaska Satellite Facility DAAC	DEM procesado, delimitación de cuenca, red de drenaje, pendientes y parámetros morfométricos	Caracterización física de la cuenca y construcción del modelo hidrológico
Pendiente	Elaboración propia mediante procesamiento del DEM en QGIS	Capa de pendientes y clasificación por rangos	Interpretación de la respuesta hidrológica y cálculo de parámetros físicos
Uso y cobertura del suelo	Shapefile descargado del portal Geo GPS Perú	Capa vectorial Uso_suelo.shp, con las clases de cobertura presentes en la cuenca	Caracterización de las condiciones superficiales de la cuenca
Número de Curva	Shapefile descargado del portal Geo GPS Perú	Capa vectorial cn_tesis.shp, con rangos y valores representativos de CN	Estimación de pérdidas hidrológicas mediante el método SCS-CN
Polígono de cuenca	Elaboración propia mediante procesamiento hidrológico del DEM	Límite espacial de la cuenca tributaria hasta el punto de salida en Sayán	Recorte, delimitación y análisis de los insumos geoespaciales
Red de drenaje	Elaboración propia mediante procesamiento del DEM en HEC-HMS	Cauces y elementos de drenaje generados para cada escenario	Construcción de la estructura del modelo y conducción de los caudales hacia Sayán

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial realizado en QGIS y Python para la caracterización hidrológica de la cuenca del río Huaura.

Anexo C. Escenarios de discretización espacial en URHs

El presente anexo muestra la representación espacial y las características físicas, geomorfológicas e hidrológicas derivadas de los escenarios de discretización en URHs empleados en la cuenca del río Huaura. Se presentan los escenarios de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, considerando variables como área, elevación media, pendiente media, longitud de flujo, pendiente del cauce, Número de Curva ponderado y tiempo de concentración. Esta información permite evidenciar cómo la variación del nivel de discretización espacial modifica la representación interna de la cuenca dentro del modelo hidrológico semidistribuido.

Tabla C1

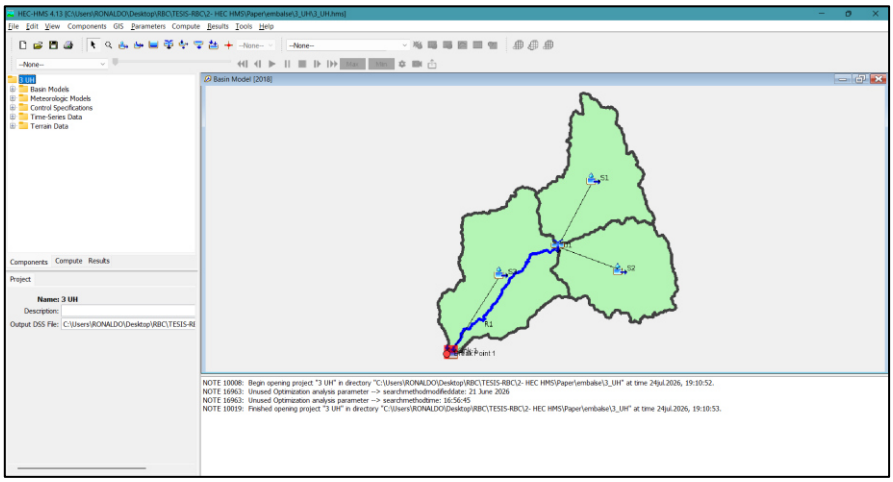
Resumen general de los escenarios de discretización espacial en URHs

Escenario	N.° de URHs	Área total (km²)	Área media por URH (km²)	Área mínima (km²)	Área máxima (km²)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)
E1	3	2,841.23	947.07	817.41	1,137.18	67	9.3
E2	5	2,841.23	568.28	260.92	886.63	67	7.9
E3	9	2,841.23	315.69	64.14	817.41	67	6.2
E4	17	2,841.23	167.13	9.59	378.38	67	4.7
E5	35	2,841.23	81.18	0.07	199.74	67	3.9
E6	65	2,841.23	43.71	0.07	132.33	67	3.1
E7	153	2,841.23	18.57	0.02	83.37	67	2.3

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Figura C1

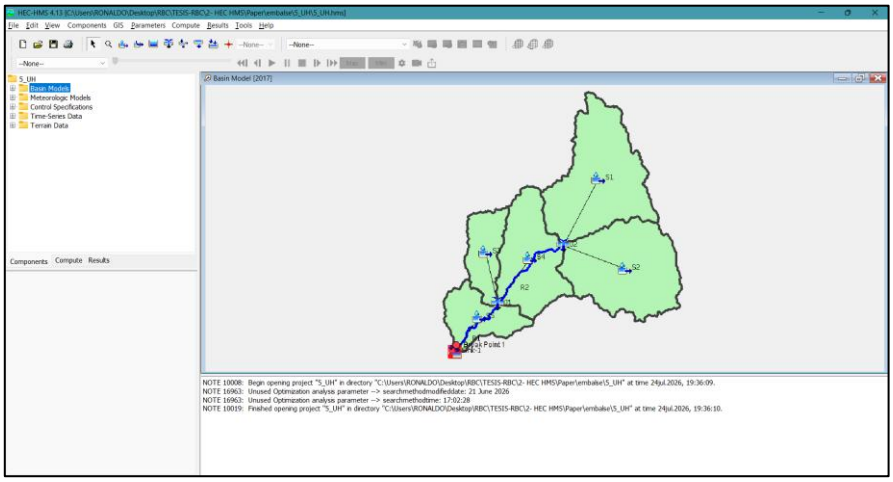
Escenario de discretización espacial de 3 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C2

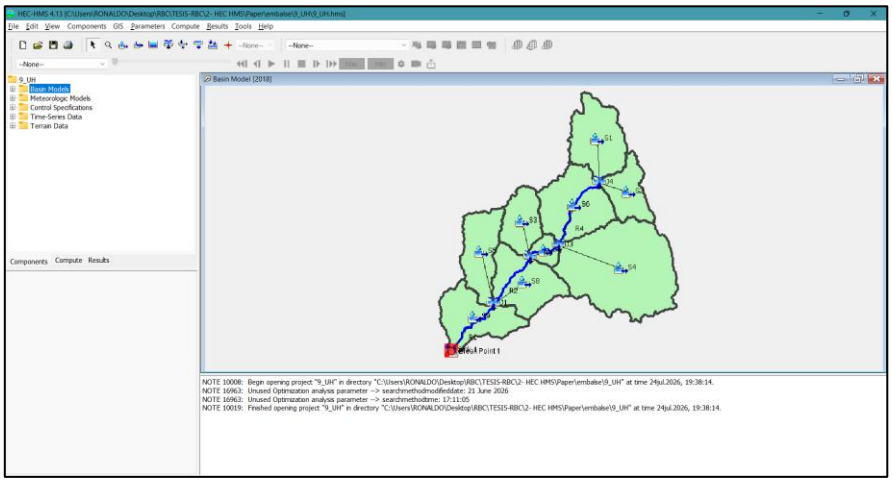
Escenario de discretización espacial de 5 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C3

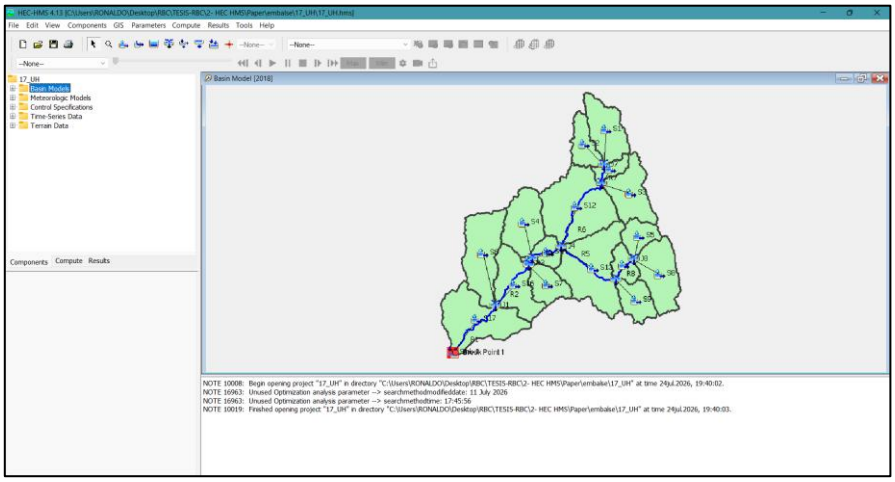
Escenario de discretización espacial de 9 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C4

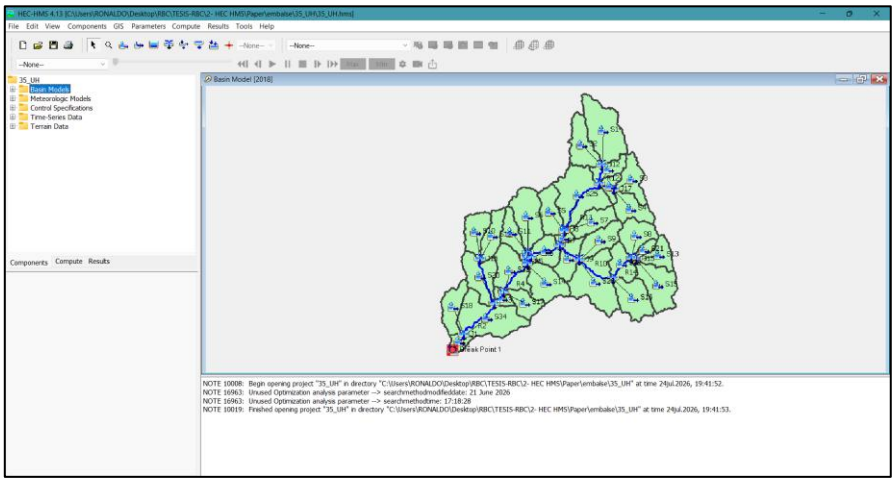
Escenario de discretización espacial de 17 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C5

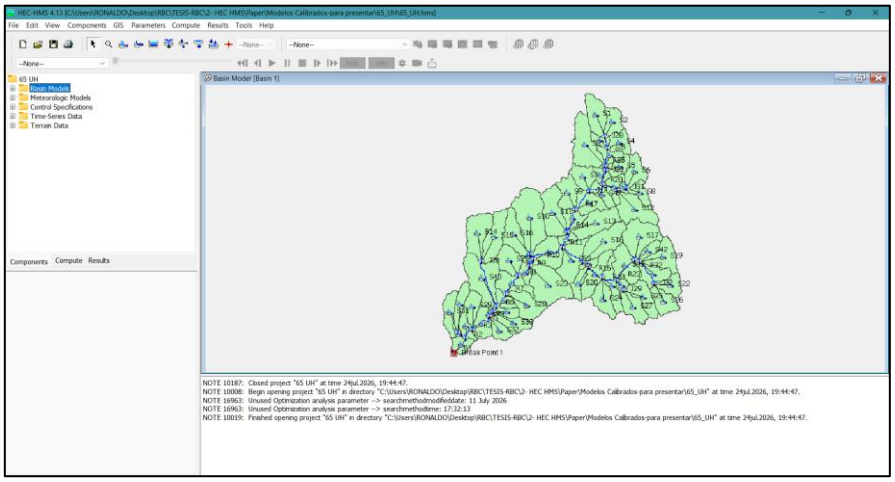
Escenario de discretización espacial de 35 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C6

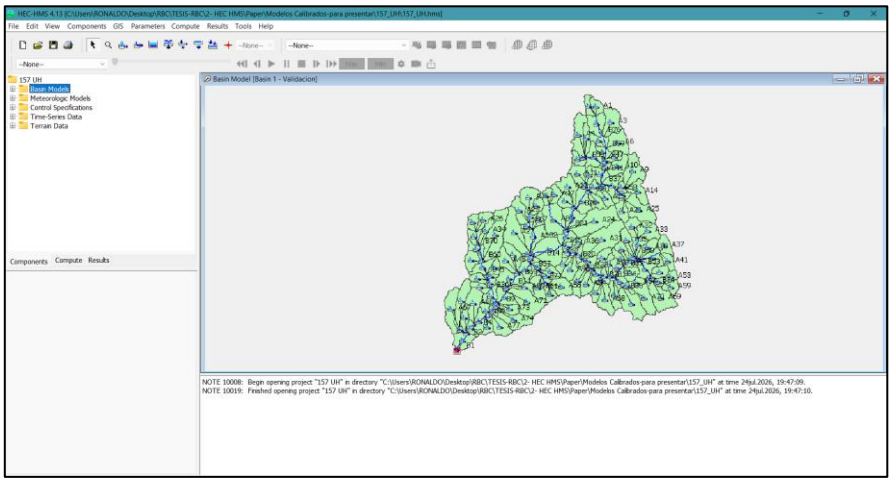
Escenario de discretización espacial de 65 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Figura C7

Escenario de discretización espacial de 153 URHs



Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial del escenario de discretización espacial correspondiente.

Tabla C2

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 3 URHs

N.° de URHs	Área (km²)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	886.6	31 %	4,354.03	63.7	0.54	69.68	8.95	5.37
URH 2	817.4	29 %	4,242.57	58.8	0.52	66.26	8.40	5.04
URH 3	1137.2	40 %	3,075.40	75.5	0.57	64.62	10.22	6.13

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C3

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 3 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km²)	947.07	886.6	817.4	1137.2	168.26

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Elevación media (m s. n. m.)	3,890.67	4,242.57	3,075.4	4,354.03	708.24
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.54	0.54	0.52	0.57	0.03
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	66	63.7	58.8	75.5	8.58
CN ponderado	66.85	66.26	64.62	69.68	2.58
Tc (h)	9.19	8.95	8.4	10.22	0.93
Tiempo de retardo (h)	5.51	5.37	5.04	6.13	0.56

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C4

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 3 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	59.46	0.02	1463	1.31

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C5

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 5 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	886.6	31 %	4,354.03	63.7	0.54	69.68	8.95	5.37
URH 2	817.4	29 %	4,242.57	58.8	0.52	66.26	8.40	5.04
URH 3	578.8	20 %	3,661.76	50.3	0.57	65.92	7.29	4.38
URH 4	260.9	9 %	3,377.85	37.8	0.53	63.08	6.03	3.62
URH 5	297.4	10 %	1,972.36	37.9	0.62	66.49	5.78	3.47

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C6

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 5 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km²)	568.22	578.8	260.9	886.6	287.82
Elevación media (m s. n. m.)	3,521.71	3,661.76	1,972.36	4,354.03	955.67
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.56	0.54	0.52	0.62	0.04
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	49.7	50.3	37.8	63.7	11.83
CN ponderado	66.29	66.26	63.08	69.68	2.34
Tc (h)	7.29	7.29	5.78	8.95	1.4
Tiempo de retardo (h)	4.38	4.38	3.47	5.37	0.84

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C7

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 5 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	25.21	0.02	516	1.33
R2	34.25	0.03	947	1.30

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C8

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 9 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	321.1	11 %	4581.8	34.5	0.51	75.79	5.44	3.26
URH 2	187.1	7 %	4529.3	25.8	0.53	70.18	4.25	2.55
URH 3	817.4	29 %	4059.4	58.8	0.52	68.66	8.40	5.04
URH 4	378.4	13 %	4242.6	35.3	0.58	66.26	5.33	3.20

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 5	194.0	7 %	3661.8	28.2	0.50	65.92	4.69	2.81
URH 6	64.1	2 %	4074.1	17.6	0.65	64.24	3.10	1.86
URH 7	320.7	11 %	3019.2	39.6	0.60	56.47	6.03	3.62
URH 8	260.9	9 %	3037.4	37.8	0.53	61.03	6.03	3.62
URH 9	297.4	10 %	1972.4	37.9	0.62	66.49	5.78	3.47

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C9

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 9 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km^2)	315.68	297.4	64.1	817.4	210.26
Elevación media (m s. n. m.)	3686.44	4059.4	1972.4	4581.8	859.93
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.56	0.53	0.5	0.65	0.05
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	35.06	35.3	17.6	58.8	11.39
CN ponderado	66.12	66.26	56.47	75.79	5.47
Tc (h)	5.45	5.44	3.1	8.4	1.46
Tiempo de retardo (h)	3.27	3.26	1.86	5.04	0.88

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C10

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 9 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	25.21	0.02	516	1.33
R2	22.09	0.02	552	1.23
R3	12.15	0.03	395	1.30
R4	29.21	0.04	1220	1.30

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C11

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 17 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	174.1	6 %	4638.9	27.7	0.49	76.55	4.66	2.79
URH 2	98.6	3 %	4643.3	24.3	0.53	78.15	4.28	2.57
URH 3	187.1	7 %	4529.3	25.8	0.53	70.18	4.25	2.55
URH 11	48.4	2 %	4250.7	17.6	0.50	68.27	3.35	2.01
URH 8	206.4	7 %	4652.2	26.2	0.51	71.70	4.31	2.59
URH 5	87.4	3 %	4636.2	18.7	0.48	71.76	3.40	2.04
URH 9	110.0	4 %	4466.5	22.3	0.50	67.48	3.92	2.35
URH 10	69.0	2 %	4135.6	15.8	0.56	67.03	2.85	1.71
URH 12	378.4	13 %	4074.1	35.3	0.58	64.24	5.33	3.20
URH 13	344.7	12 %	3847.5	33.8	0.53	61.07	5.24	3.14
URHs 4	194.0	7 %	4059.4	28.2	0.50	68.66	4.69	2.81
URH 14	64.1	2 %	3019.2	17.6	0.65	56.47	3.10	1.86
URH 7	107.5	4 %	3692.2	20.6	0.52	61.91	3.61	2.17
URH 15	9.6	0.3 %	2348.7	7.0	0.65	56.12	1.50	0.90
URH 6	260.9	9 %	3661.8	37.8	0.53	65.92	6.03	3.62
URH 16	203.7	7 %	2724.2	25.9	0.64	60.79	4.07	2.44
URH 17	297.4	10 %	1972.4	37.9	0.62	66.49	5.78	3.47

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C12

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 17 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km²)	167.14	174.1	9.6	378.4	106.95
Elevación media (m s. n. m.)	3,844.25	4,074.1	1,972.4	4,652.2	847.34
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.55	0.53	0.48	0.65	0.06
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	24.85	25.8	7	37.9	8.36
CN ponderado	66.63	67.03	56.12	78.15	6.18
Tc (h)	4.14	4.25	1.5	6.03	1.14
Tiempo de retardo (h)	2.48	2.55	0.9	3.62	0.68

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C13

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 17 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	25.21	0.02	516	1.33
R2	18.96	0.02	460	1.21
R3	3.14	0.03	92	1.36
R4	12.16	0.03	395	1.30
R5	22.71	0.04	825	1.18
R6	29.22	0.04	1220	1.30
R7	6.85	0.04	245	1.23
R8	9.86	0.05	521	1.21

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C14

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 35 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	174.1	6 %	4638.9	27.7	0.49	76.55	4.66	2.79
URH 2	98.6	3 %	4643.3	24.3	0.53	78.15	4.28	2.57
URH 4	78.3	3 %	4625.3	19.7	0.51	71.22	3.56	2.14
URH 3	77.7	3 %	4575.0	20.3	0.55	71.62	3.62	2.17
URH 24	48.4	2 %	4250.7	17.6	0.50	68.27	3.35	2.01
URH 19	31.1	1 %	4173.9	10.4	0.51	63.98	2.07	1.24
URH 25	199.8	7 %	4096.0	29.2	0.61	64.01	4.65	2.79
URH 7	76.9	3 %	4267.9	22.8	0.57	64.66	4.05	2.43
URH 5	84.6	3 %	4086.7	20.2	0.51	66.07	3.63	2.18
URH 28	0.1	0.003 %	2356.9	0.5	0.34	56.12	0.20	0.12
URH 15	123.9	4 %	4678.1	24.5	0.48	71.76	4.28	2.57
URH 13	59.9	2 %	4642.2	17.1	0.53	71.76	3.16	1.90
URH 8	87.4	3 %	4636.2	18.7	0.48	71.76	3.40	2.04
URH 21	22.5	1 %	4536.3	13.0	0.61	71.17	2.57	1.54
URH 16	110.0	4 %	4466.5	22.3	0.50	67.48	3.92	2.35
URH 22	69.0	2 %	4135.6	15.8	0.56	67.03	2.85	1.71
URH 26	189.5	7 %	3900.1	25.2	0.51	61.74	4.17	2.50
URH 9	83.4	3 %	4147.9	21.5	0.58	63.45	3.78	2.27
URH 27	71.8	3 %	3359.8	15.5	0.52	56.53	2.82	1.69
URH 29	17.1	1 %	2889.1	7.9	0.64	56.12	1.59	0.95
URH 6	132.3	5 %	4113.2	26.0	0.50	69.45	4.49	2.69
URH 11	59.3	2 %	4007.4	20.0	0.49	67.41	3.75	2.25
URH 30	64.1	2 %	3019.2	17.6	0.65	56.47	3.10	1.86
URH 23	2.3	0.1 %	2299.7	5.0	0.62	56.12	1.23	0.74
URH 14	107.5	4 %	3692.2	20.6	0.52	61.91	3.61	2.17
URH 31	9.6	0.3 %	2348.7	7.0	0.65	56.12	1.50	0.90
URH 32	120.1	4 %	2647.2	20.6	0.67	59.10	3.38	2.03
URH 17	59.8	2 %	3188.1	17.0	0.57	60.99	3.09	1.85
URH 10	76.7	3 %	4264.9	19.9	0.41	73.31	3.79	2.27
URH 12	71.4	3 %	4180.5	20.8	0.48	69.77	3.86	2.32
URH 20	112.9	4 %	2923.7	22.5	0.64	58.45	3.76	2.26
URH 33	23.7	1 %	1942.3	8.9	0.67	68.87	1.72	1.03
URH 34	193.4	7 %	1984.1	31.5	0.64	66.74	4.98	2.99
URH 18	78.5	3 %	2228.9	22.0	0.63	64.51	3.83	2.30
URH 35	25.5	1 %	1095.1	9.4	0.49	70.68	1.93	1.16

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C15

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 35 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km²)	81.18	76.9	0.1	199.8	52.41
Elevación media (m s. n. m.)	3,629.76	4,096	1,095.1	4,678.1	991.36
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.55	0.53	0.34	0.67	0.08
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	18.37	20	0.5	31.5	7.03
CN ponderado	65.7	66.74	56.12	78.15	6.22
Tc (h)	3.28	3.61	0.2	4.98	1.09
Tiempo de retardo (h)	1.97	2.17	0.12	2.99	0.65

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C16

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 35 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	6.42	0.02	125	1.15
R10	14.09	0.04	570	1.19
R11	23.06	0.04	1018	1.30
R12	6.85	0.03	245	1.22
R13	2.21	0.07	171	1.26
R14	9.86	0.05	521	1.20
R15	1.75	0.10	191	1.12
R16	16.93	0.08	1490	1.20
R17	5.49	0.05	308	1.14
R2	18.79	0.02	391	1.40
R3	5.29	0.02	105	1.18
R4	13.66	0.03	355	1.21
R5	3.13	0.03	92	1.35
R6	12.15	0.03	395	1.29
R7	5.77	0.03	179	1.22
R8	0.37	0.06	23	1.18

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R9	8.61	0.03	255	1.15

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C17

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 65 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	58.579	2 %	4732.2	17.7	0.46	79.27	3.36	2.01
URH 2	37.562	1 %	4681.5	12.9	0.55	78.95	2.47	1.48
URH 4	36.227	1 %	4632.3	11.4	0.49	72.03	2.26	1.36
URH 38	16.351	1 %	4550.2	9.7	0.42	77.77	2.14	1.28
URH 3	98.618	3 %	4643.3	24.3	0.53	78.16	4.28	2.57
URH 41	25.419	1 %	4427.3	9.8	0.54	72.36	1.97	1.18
URH 5	26.388	1 %	4517.3	12.3	0.52	70.83	2.47	1.48
URH 45	5.0803	0.2 %	3943.6	3.9	0.47	62.48	0.95	0.57
URH 6	44.047	2 %	4596.5	17.2	0.52	71.76	3.29	1.97
URH 8	26.58	1 %	4624.4	12.6	0.59	71.82	2.48	1.49
URH 12	78.349	3 %	4625.3	19.7	0.51	71.22	3.56	2.14
URH 35	7.0239	0.2 %	4253.1	5.3	0.62	69.98	1.18	0.71
URH 39	31.135	1 %	4173.9	10.4	0.51	63.97	2.07	1.24
URH 46	16.896	1 %	3926.6	8.3	0.49	66.05	1.75	1.05
URH 7	42.829	2 %	4386.2	12.7	0.61	69.75	2.36	1.42
URH 47	27.879	1 %	4098.0	12.5	0.64	62.55	2.41	1.45
URH 49	49.395	2 %	3976.3	17.4	0.65	60.31	3.15	1.89
URH 9	49.083	2 %	4382.4	14.2	0.47	68.18	2.75	1.65
URH 13	76.928	3 %	4267.9	22.8	0.57	64.66	4.05	2.43
URH 52	30.563	1 %	3421.0	10.5	0.74	56.61	1.95	1.17
URH 11	84.55	3 %	4086.7	20.2	0.51	66.08	3.63	2.18
URH 54	0.0722	0.003 %	2356.9	0.5	0.34	56.12	0.20	0.12
URH 26	45.277	2 %	4761.8	15.1	0.41	71.76	3.02	1.81
URH 22	34.683	1 %	4724.6	11.2	0.45	71.76	2.24	1.35
URH 19	59.923	2 %	4642.2	17.1	0.53	71.76	3.16	1.90
URH 34	43.928	2 %	4555.2	15.3	0.58	71.76	2.86	1.72
URH 17	87.41	3 %	4636.2	18.7	0.48	71.76	3.40	2.04

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 42	22.547	1 %	4536.3	13.0	0.61	71.17	2.57	1.54
URH 25	51.482	2 %	4617.0	18.3	0.50	70.68	3.47	2.08
URH 27	47.547	2 %	4489.7	14.1	0.47	65.93	2.72	1.63
URH 43	68.958	2 %	4135.6	15.8	0.56	67.03	2.85	1.71
URH 37	10.947	0.4 %	3658.4	6.1	0.57	59.14	1.31	0.78
URH 24	48.18	2 %	4188.5	16.0	0.49	64.58	3.07	1.84
URH 48	45.743	2 %	3946.4	16.3	0.50	60.40	3.13	1.88
URH 50	57.325	2 %	3751.4	13.1	0.54	60.71	2.43	1.46
URH 20	25.862	1 %	4001.3	13.5	0.53	63.74	2.71	1.62
URH 18	83.379	3 %	4147.9	21.5	0.58	63.45	3.78	2.27
URH 51	12.409	0.4 %	3085.5	7.1	0.49	56.12	1.56	0.94
URH 53	71.811	3 %	3359.8	15.5	0.52	56.53	2.82	1.69
URH 55	17.077	1 %	2889.1	7.9	0.64	56.12	1.59	0.95
URH 10	132.33	5 %	4113.2	26.0	0.50	69.45	4.49	2.69
URH 16	59.34	2 %	4007.4	20.0	0.49	67.42	3.75	2.25
URH 56	64.143	2 %	3019.2	17.6	0.65	56.47	3.10	1.86
URH 44	2.2964	0.1 %	2299.7	5.0	0.62	56.12	1.23	0.74
URH 23	107.49	4 %	3692.2	20.6	0.52	61.90	3.61	2.17
URH 57	9.5883	0.3 %	2348.7	7.0	0.65	56.12	1.50	0.90
URH 21	50.438	2 %	2966.9	12.4	0.65	57.20	2.23	1.34
URH 58	18.375	1 %	2388.9	8.1	0.77	56.29	1.57	0.94
URH 28	59.84	2 %	3188.1	17.0	0.57	60.99	3.09	1.85
URH 59	51.326	2 %	2425.4	12.8	0.65	61.98	2.31	1.39
URH 14	76.682	3 %	4264.9	19.9	0.41	73.31	3.79	2.27
URH 15	71.397	3 %	4180.5	20.8	0.48	69.78	3.86	2.32
URH 40	112.85	4 %	2923.7	22.5	0.64	58.45	3.76	2.26
URH 60	23.671	1 %	1942.3	8.9	0.67	68.87	1.72	1.03
URH 33	36.951	1 %	2601.8	15.1	0.67	61.47	2.79	1.68
URH 61	19.742	1 %	2243.9	11.0	0.71	65.61	2.14	1.29
URH 32	26.269	1 %	2181.1	10.5	0.68	65.87	2.00	1.20
URH 62	5.0714	0.2 %	1448.2	3.9	0.57	71.76	0.92	0.55
URH 63	43.615	2 %	1560.6	13.7	0.64	71.76	2.53	1.52
URH 29	35.916	1 %	2074.1	14.8	0.63	63.35	2.78	1.67
URH 31	39.875	1 %	2150.1	16.6	0.60	66.66	3.11	1.87
URH 30	35.463	1 %	2418.8	18.4	0.68	61.47	3.42	2.05
URH 64	25.838	1 %	1397.1	11.3	0.54	71.30	2.27	1.36
URH 36	3.1361	0.1 %	1082.2	4.7	0.41	71.60	1.23	0.74
URH 65	25.54	1 %	1095.1	9.4	0.49	70.68	1.93	1.16

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C18

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 65 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km²)	43.71	39.88	0.07	132.33	28.64
Elevación media (m s. n. m.)	3,560.68	4,001.3	1,082.2	4,761.8	1,073.18
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.56	0.54	0.34	0.77	0.09
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	13.69	13.5	0.5	26	5.44
CN ponderado	66.17	66.08	56.12	79.27	6.36
Tc (h)	2.59	2.57	0.2	4.49	0.9
Tiempo de retardo (h)	1.56	1.54	0.12	2.69	0.54

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C19

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 65 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	6.42	0.02	125	1.15
R10	12.16	0.03	395	1.30
R11	5.78	0.03	179	1.23
R12	0.37	0.06	23	1.19
R13	8.61	0.03	255	1.16
R14	8.24	0.05	426	1.20
R15	2.69	0.03	93	1.11
R16	6.16	0.04	217	1.19
R17	8.23	0.04	312	1.17
R18	5.24	0.05	260	1.17
R19	6.60	0.04	280	1.50
R2	4.76	0.02	99	1.48
R20	5.28	0.04	213	1.24
R21	1.57	0.02	32	1.11
R22	2.22	0.08	171	1.26
R23	9.86	0.05	521	1.21
R24	1.75	0.11	191	1.12

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R25	6.01	0.06	372	1.11
R26	16.93	0.09	1490	1.20
R27	5.50	0.06	308	1.15
R28	3.99	0.05	189	1.11
R29	3.96	0.09	360	1.14
R3	9.34	0.02	151	1.46
R30	3.60	0.06	203	1.24
R31	3.09	0.08	247	1.11
R32	9.36	0.06	574	1.15
R4	2.30	0.03	58	1.20
R5	2.40	0.03	83	1.24
R6	5.29	0.02	105	1.18
R7	8.17	0.02	185	1.22
R8	5.50	0.03	170	1.20
R9	3.14	0.03	92	1.36

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C20

Características físicas y geomorfológicas del escenario de 153 URHs

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 1	15.5	1 %	4821.1	8.3	0.46	79.70	1.80	1.08
URH 2	12.7	0.4 %	4704.6	9.9	0.51	79.12	2.17	1.30
URH 3	37.6	1 %	4681.5	12.9	0.55	78.95	2.47	1.48
URH 78	30.4	1 %	4698.4	11.3	0.45	79.12	2.30	1.38
URH 6	36.2	1 %	4632.3	11.4	0.49	72.03	2.26	1.36
URH 95	16.4	1 %	4550.2	9.7	0.42	77.77	2.14	1.28
URH 7	11.5	0.4 %	4606.3	7.6	0.52	71.76	1.66	0.99
URH 107	11.3	0.4 %	4339.6	6.9	0.53	73.39	1.50	0.90
URH 4	40.1	1 %	4750.9	16.5	0.51	79.12	3.19	1.91
URH 5	17.1	1 %	4716.2	12.3	0.54	79.12	2.57	1.54
URH 8	13.2	0.5 %	4758.0	8.8	0.50	79.12	1.92	1.15
URH 99	1.0	0.04 %	4448.9	2.3	0.57	79.12	0.64	0.38
URH 100	27.2	1 %	4389.7	11.2	0.56	75.63	2.21	1.33

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 110	2.6	0.1 %	4021.3	3.6	0.66	70.59	0.86	0.51
URH 10	26.4	1 %	4517.3	12.3	0.52	70.83	2.47	1.48
URH 113	5.1	0.2 %	3943.6	3.9	0.47	62.48	0.95	0.57
URH 9	44.0	2 %	4596.5	17.2	0.52	71.76	3.29	1.97
URH 14	26.6	1 %	4624.4	12.6	0.59	71.82	2.48	1.49
URH 25	49.4	2 %	4661.9	15.0	0.52	71.76	2.84	1.70
URH 21	19.5	1 %	4701.1	9.1	0.45	71.76	1.93	1.16
URH 91	9.5	0.3 %	4279.0	6.5	0.61	67.26	1.40	0.84
URH 96	7.0	0.2 %	4253.1	5.3	0.62	69.98	1.18	0.71
URH 106	31.1	1 %	4173.9	10.4	0.51	63.97	2.07	1.24
URH 117	16.9	1 %	3926.6	8.3	0.49	66.05	1.75	1.05
URH 15	15.8	1 %	4399.0	8.3	0.57	65.03	1.72	1.03
URH 122	2.8	0.1 %	3660.3	3.8	0.81	57.72	0.87	0.52
URH 11	24.3	1 %	4519.2	9.9	0.60	72.23	1.96	1.18
URH 12	13.6	0.5 %	4369.3	8.1	0.61	68.39	1.69	1.02
URH 123	9.2	0.3 %	3714.5	6.5	0.71	59.74	1.37	0.82
URH 79	4.9	0.2 %	3777.8	5.0	0.63	61.22	1.14	0.68
URH 19	18.6	1 %	4386.0	9.5	0.58	62.81	1.95	1.17
URH 127	0.1	0.004 %	3174.7	0.6	0.81	56.12	0.20	0.12
URH 13	31.2	1 %	4517.6	13.2	0.40	70.17	2.76	1.66
URH 20	17.6	1 %	4170.2	6.8	0.59	64.88	1.38	0.83
URH 128	30.7	1 %	3731.4	9.6	0.69	58.81	1.80	1.08
URH 90	0.3	0.01 %	2997.3	1.4	0.68	56.12	0.41	0.25
URH 24	76.9	3 %	4267.9	22.8	0.57	64.66	4.05	2.43
URH 133	30.6	1 %	3421.0	10.5	0.74	56.61	1.95	1.17
URH 17	15.2	1 %	4665.8	8.3	0.34	74.97	1.92	1.15
URH 18	12.9	0.5 %	4582.8	6.5	0.45	78.13	1.44	0.86
URH 81	56.4	2 %	3816.4	13.7	0.57	60.91	2.51	1.50
URH 138	0.1	0.003 %	2356.9	0.5	0.34	56.12	0.20	0.12
URH 59	15.5	1 %	4763.9	7.0	0.39	71.76	1.57	0.94
URH 53	11.7	0.4 %	4751.4	6.5	0.48	71.76	1.44	0.87
URH 69	45.3	2 %	4761.8	15.1	0.41	71.76	3.02	1.81
URH 80	7.5	0.3 %	4602.1	5.9	0.55	71.76	1.33	0.80
URH 51	16.5	1 %	4708.7	8.4	0.50	71.76	1.78	1.07
URH 93	6.1	0.2 %	4581.4	4.3	0.59	71.76	0.98	0.59
URH 37	20.5	1 %	4729.8	8.0	0.50	71.76	1.66	1.00
URH 41	15.5	1 %	4714.9	9.3	0.46	71.76	2.01	1.20
URH 82	23.9	1 %	4519.8	10.6	0.59	71.76	2.10	1.26
URH 101	21.3	1 %	4428.9	9.4	0.64	71.76	1.84	1.11

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 38	19.8	1 %	4620.6	11.4	0.60	71.76	2.29	1.37
URH 111	0.3	0.01 %	3909.8	1.4	0.61	71.76	0.43	0.26
URH 33	31.1	1 %	4722.1	11.4	0.46	71.76	2.31	1.39
URH 32	19.9	1 %	4736.3	8.1	0.36	71.76	1.81	1.09
URH 35	19.9	1 %	4588.9	11.8	0.55	71.76	2.42	1.45
URH 86	16.3	1 %	4419.1	9.2	0.59	71.76	1.90	1.14
URH 112	2.4	0.1 %	3940.3	3.1	0.73	66.25	0.73	0.44
URH 104	0.2	0.01 %	3611.6	1.1	0.58	71.51	0.37	0.22
URH 39	14.5	1 %	4352.0	8.1	0.55	69.72	1.72	1.03
URH 115	5.1	0.2 %	3993.0	5.4	0.64	63.26	1.22	0.73
URH 48	17.0	1 %	4343.4	7.7	0.51	69.13	1.62	0.97
URH 119	13.9	0.5 %	4131.3	8.6	0.54	65.69	1.84	1.10
URH 70	37.9	1 %	4692.5	15.9	0.48	71.30	3.14	1.88
URH 57	10.5	0.4 %	4560.8	7.0	0.52	71.64	1.54	0.92
URH 72	47.5	2 %	4489.7	14.1	0.47	65.93	2.72	1.63
URH 98	3.1	0.1 %	3875.8	3.3	0.71	59.72	0.77	0.46
URH 120	18.4	1 %	3816.7	8.9	0.62	65.04	1.79	1.08
URH 103	10.9	0.4 %	3658.4	6.1	0.57	59.14	1.31	0.78
URH 65	23.0	1 %	4159.2	12.0	0.47	58.98	2.49	1.50
URH 124	0.6	0.02 %	3097.1	1.4	0.75	56.12	0.39	0.24
URH 50	11.8	0.4 %	4171.4	9.2	0.48	67.20	2.04	1.22
URH 125	2.3	0.1 %	3193.6	2.5	0.66	56.12	0.61	0.37
URH 68	30.7	1 %	4310.5	13.0	0.45	65.12	2.65	1.59
URH 62	13.4	0.5 %	4165.1	7.7	0.55	65.90	1.65	0.99
URH 126	8.1	0.3 %	3295.0	5.0	0.55	56.12	1.12	0.67
URH 88	4.1	0.1 %	3340.8	5.1	0.64	56.12	1.19	0.71
URH 43	19.4	1 %	4019.7	10.2	0.53	63.00	2.11	1.27
URH 129	11.4	0.4 %	3224.1	6.1	0.56	56.12	1.31	0.79
URH 54	23.1	1 %	3922.9	10.8	0.54	61.73	2.19	1.32
URH 130	0.0	0.001 %	2605.6	0.3	0.17	56.12	0.17	0.10
URH 55	25.9	1 %	4001.3	13.5	0.53	63.74	2.71	1.62
URH 131	3.4	0.1 %	2824.9	3.4	0.52	56.12	0.84	0.50
URH 31	83.4	3 %	4147.9	21.5	0.58	63.45	3.78	2.27
URH 132	12.4	0.4 %	3085.5	7.1	0.49	56.12	1.56	0.94
URH 46	22.2	1 %	3669.0	10.0	0.54	57.36	2.03	1.22
URH 134	9.5	0.3 %	3007.6	6.0	0.52	56.12	1.33	0.80
URH 42	12.8	0.5 %	3553.7	8.4	0.54	56.25	1.81	1.09
URH 135	2.6	0.1 %	2742.6	4.2	0.47	56.12	1.09	0.65
URH 36	11.5	0.4 %	3722.7	9.9	0.47	56.12	2.22	1.33

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 136	6.3	0.2 %	2726.2	5.4	0.47	56.12	1.28	0.77
URH 139	17.1	1 %	2889.1	7.9	0.64	56.12	1.59	0.95
URH 137	6.8	0.2 %	2683.3	5.7	0.54	56.12	1.30	0.78
URH 16	31.2	1 %	4633.2	11.6	0.37	77.00	2.46	1.48
URH 22	14.8	1 %	4543.1	8.1	0.42	78.21	1.80	1.08
URH 23	24.7	1 %	4427.5	10.6	0.49	77.20	2.18	1.31
URH 87	6.4	0.2 %	3987.9	5.3	0.57	68.84	1.19	0.72
URH 29	11.5	0.4 %	4244.0	7.2	0.41	65.86	1.65	0.99
URH 92	6.8	0.2 %	3680.2	4.6	0.60	59.42	1.04	0.62
URH 27	59.3	2 %	4007.4	20.0	0.49	67.42	3.75	2.25
URH 102	36.8	1 %	3348.8	12.5	0.63	57.40	2.33	1.40
URH 140	64.1	2 %	3019.2	17.6	0.65	56.47	3.10	1.86
URH 116	2.3	0.1 %	2299.7	5.0	0.62	56.12	1.23	0.74
URH 56	29.0	1 %	4294.8	10.5	0.48	69.03	2.13	1.28
URH 58	10.6	0.4 %	4343.7	7.0	0.44	67.59	1.59	0.95
URH 61	22.2	1 %	3550.8	9.9	0.46	58.91	2.08	1.25
URH 83	10.4	0.4 %	3183.7	7.3	0.51	56.60	1.62	0.97
URH 49	13.2	0.5 %	3744.9	8.7	0.65	59.91	1.79	1.07
URH 89	6.7	0.2 %	3217.0	8.5	0.53	57.46	1.96	1.18
URH 97	15.4	1 %	2820.7	8.5	0.60	56.12	1.76	1.05
URH 141	9.6	0.3 %	2348.7	7.0	0.65	56.12	1.50	0.90
URH 45	25.7	1 %	2953.2	11.1	0.67	56.78	2.12	1.27
URH 40	24.6	1 %	2986.0	12.1	0.64	57.60	2.34	1.40
URH 142	18.4	1 %	2388.9	8.1	0.77	56.29	1.57	0.94
URH 85	0.1	0.003 %	1580.5	0.7	0.63	71.44	0.24	0.14
URH 143	35.5	1 %	2306.4	9.0	0.70	61.86	1.65	0.99
URH 60	11.8	0.4 %	3066.6	10.2	0.50	59.14	2.24	1.35
URH 71	59.8	2 %	3188.1	17.0	0.57	60.99	3.09	1.85
URH 144	4.0	0.1 %	1594.7	3.5	0.60	71.40	0.84	0.50
URH 26	17.2	1 %	4561.4	9.6	0.37	78.84	2.15	1.29
URH 30	14.2	1 %	4478.1	6.5	0.30	78.57	1.55	0.93
URH 34	16.1	1 %	4359.9	11.9	0.41	75.48	2.65	1.59
URH 84	14.6	1 %	4151.6	7.9	0.41	70.98	1.77	1.06
URH 28	71.4	3 %	4180.5	20.8	0.48	69.78	3.86	2.32
URH 94	14.4	1 %	3709.6	9.1	0.54	61.49	1.92	1.15
URH 44	21.1	1 %	3546.6	6.8	0.59	56.85	1.36	0.82
URH 108	1.4	0.1 %	2940.3	1.9	0.76	56.12	0.49	0.29
URH 109	20.9	1 %	3140.0	7.9	0.57	56.12	1.59	0.96
URH 47	13.0	0.5 %	3315.0	7.9	0.51	56.12	1.71	1.02

N.° de URHs	Área (km^2)	Área (%)	Elevación media (m s. n. m.)	Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	Pendiente media de la subcuenca (m/m)	CN medio ponderado	Tiempo de concentración, Tc (h)	Tiempo de retardo (h)
URH 52	12.4	0.4 %	3031.5	7.1	0.71	56.12	1.44	0.86
URH 114	5.3	0.2 %	2877.1	5.6	0.59	56.12	1.28	0.77
URH 63	12.7	0.4 %	2703.5	7.9	0.73	58.78	1.60	0.96
URH 118	7.4	0.3 %	2468.6	4.9	0.76	57.14	1.05	0.63
URH 145	23.7	1 %	1942.3	8.9	0.67	68.87	1.72	1.03
URH 121	18.7	1 %	1975.1	7.4	0.71	67.16	1.44	0.87
URH 73	16.2	1 %	2432.8	9.0	0.74	64.26	1.78	1.07
URH 146	0.2	0.01 %	1245.0	1.3	0.28	71.76	0.50	0.30
URH 74	37.0	1 %	2601.8	15.1	0.67	61.47	2.79	1.68
URH 147	3.4	0.1 %	1384.9	3.3	0.60	71.76	0.79	0.47
URH 77	26.3	1 %	2181.1	10.5	0.68	65.87	2.00	1.20
URH 148	5.1	0.2 %	1448.2	3.9	0.57	71.76	0.92	0.55
URH 149	13.1	0.5 %	1604.1	7.9	0.64	71.76	1.64	0.98
URH 75	11.2	0.4 %	1763.4	6.9	0.65	71.76	1.45	0.87
URH 66	35.9	1 %	2074.1	14.8	0.63	63.35	2.78	1.67
URH 150	19.4	1 %	1414.2	8.1	0.63	71.76	1.62	0.97
URH 76	14.8	1 %	1530.9	10.9	0.54	71.05	2.30	1.38
URH 151	10.7	0.4 %	1228.4	6.6	0.55	71.76	1.44	0.86
URH 67	39.9	1 %	2150.1	16.6	0.60	66.66	3.11	1.87
URH 64	35.5	1 %	2418.8	18.4	0.68	61.47	3.42	2.05
URH 105	3.1	0.1 %	1082.2	4.7	0.41	71.60	1.23	0.74
URH 152	0.4	0.01 %	931.0	1.2	0.51	67.94	0.36	0.22
URH 153	25.5	1 %	1095.1	9.4	0.49	70.68	1.93	1.16

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C21

Cuadro resumen de las características físicas y geomorfológicas del escenario de 153 URHs

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Área (km^2)	18.57	15.5	0	83.4	15.55
Elevación media (m s. n. m.)	3,605.46	3,987.9	931	4,821.1	1023.46
Pendiente media de la subcuenca (m/m)	0.55	0.55	0.17	0.81	0.11
Longitud de la trayectoria hidráulicamente más larga, L (km)	8.59	8.3	0.3	22.8	4.35

Variable	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
CN ponderado	65.97	67.16	56.12	79.7	7.4
Tc (h)	1.77	1.75	0.17	4.05	0.77
Tiempo de retardo (h)	1.06	1.05	0.1	2.43	0.46

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Tabla C22

Características físicas de la red de drenaje del escenario de 153 URHs

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R1	6.4	0.02	125	1.15
R10	2.6	0.01	36	1.22
R11	5.5	0.03	149	1.21
R12	5.5	0.03	170	1.20
R13	3.1	0.03	92	1.36
R14	12.2	0.03	395	1.30
R15	5.8	0.03	179	1.23
R16	0.4	0.06	23	1.19
R17	2.5	0.03	70	1.14
R18	2.0	0.03	60	1.16
R19	1.0	0.04	40	1.17
R2	0.5	0.02	12	1.10
R20	3.1	0.03	85	1.15
R21	8.2	0.05	426	1.20
R22	2.7	0.03	93	1.11
R23	2.3	0.04	103	1.22
R24	0.1	0.02	2	1.08
R25	3.8	0.03	112	1.16
R26	7.9	0.04	298	1.18
R27	0.4	0.04	14	1.08
R28	2.6	0.04	98	1.21
R29	1.7	0.06	101	1.12
R3	4.3	0.02	87	1.46
R30	0.9	0.07	61	1.14
R31	4.3	0.06	240	1.29
R32	2.3	0.02	40	1.47
R33	5.6	0.09	505	1.17
R34	5.0	0.06	283	1.19
R35	2.7	0.05	126	1.12

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R36	3.3	0.10	328	1.18
R37	5.3	0.04	213	1.24
R38	2.2	0.08	171	1.26
R39	2.1	0.05	112	1.28
R4	5.8	0.01	81	1.26
R40	1.9	0.08	160	1.14
R41	1.6	0.02	32	1.11
R42	1.6	0.12	189	1.13
R43	0.1	0.02	2	1.00
R44	2.3	0.07	151	1.12
R45	4.9	0.08	395	1.17
R46	1.2	0.08	102	1.14
R47	3.7	0.06	221	1.11
R48	5.5	0.06	308	1.15
R49	3.6	0.06	203	1.24
R5	3.5	0.02	70	1.96
R50	0.6	0.10	58	1.09
R51	4.0	0.09	360	1.14
R52	8.6	0.12	1018	1.20
R53	6.9	0.06	421	1.14
R54	7.3	0.07	502	1.21
R55	0.6	0.07	39	1.04
R56	2.4	0.17	399	1.13
R57	3.6	0.13	483	1.17
R58	3.1	0.08	247	1.11
R59	4.0	0.05	189	1.11
R6	2.3	0.03	58	1.20
R60	4.9	0.13	643	1.15
R61	2.5	0.06	153	1.15
R62	2.8	0.15	434	1.19
R63	4.7	0.08	379	1.14
R64	1.0	0.18	175	1.13
R65	2.5	0.13	318	1.24
R66	3.0	0.12	369	1.21
R67	2.9	0.11	311	1.11
R68	6.7	0.09	638	1.14
R69	0.3	0.12	42	1.09
R7	2.0	0.04	71	1.25
R70	5.4	0.11	615	1.23
R71	4.0	0.13	515	1.19
R72	7.9	0.08	603	1.13
R73	11.9	0.14	1620	1.22
R74	4.2	0.04	149	1.21

Río	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Desnivel (m)	Sinuosidad
R75	2.8	0.12	336	1.17
R76	7.7	0.03	236	1.15
R8	0.4	0.03	12	1.15
R9	5.3	0.02	105	1.18

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento geoespacial de los escenarios de discretización espacial en URHs.

Anexo D. Configuración del modelo HEC-HMS

El presente anexo presenta información complementaria de la configuración realizada en HEC-HMS para los escenarios de discretización espacial evaluados. Se incluyen los componentes del modelo de cuenca y los principales parámetros hidrológicos empleados para el flujo base y el tránsito de caudales. Esta información complementa la metodología descrita en el Capítulo III y permite verificar la trazabilidad de la configuración del modelo.

Tabla D1

Resumen de componentes del modelo de cuenca por escenario

Escenario	N.º de URHs operacionales	N.° de reaches	N.° de junctions	N.° de sink	Observación
E1	3	1	1	1	Baja discretización
E2	5	2	2	1	Baja a moderada discretización
E3	9	4	4	1	Moderada discretización
E4	17	8	8	1	Discretización intermedia
E5	35	17	17	1	Discretización media-alta
E6	65	32	32	1	Alta discretización
E7	153	76	76	1	Mayor discretización espacial

Nota. En esta investigación, cada URH operacional corresponde a un elemento Subbasin de HEC-HMS. Los elementos Reach, Junction y Sink representan, respectivamente, los tramos de tránsito, las confluencias y el punto de salida, por lo que no forman parte del conteo de URHs.

Tabla D2

Parámetros del método Recession para flujos base

Escenario	Aplicación	Caudal inicial ($m^3/s/km^2$)	Constante de recesión	Ratio to Peak	Método
E1	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E2	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E3	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E4	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E5	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E6	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession
E7	Todas las URHs	0.015	0.98	0.20	Recession

Nota. El caudal inicial específico, la constante de recesión y la relación respecto al caudal pico fueron mantenidos constantes en todas las unidades espaciales y escenarios. Estos parámetros corresponden a una configuración homogénea de simulación continua y no a una calibración individual de cada URH. Elaboración propia.

Tabla D3

Parámetros del método Muskingum para la red de drenaje por escenario de discretización

Escenario	N.° de reaches	K medio (h)	K mínimo (h)	K máximo (h)	X medio	X	Subtramos	Condición inicial
3 URHs	1	8.12	8.12	8.12	0.5	0.5	1	Salida = entrada
5 URHs	2	2.27	2.13	2.41	0.5	0.5	1	Salida = entrada
9 URHs	4	2.28	1.02	3.85	0.5	0.5	1	Salida = entrada
17 URHs	8	1.73	0.63	3.85	0.5	0.5	1	Salida = entrada
35 URHs	17	1.19	0.14	3.85	0.5	0.5	1	Salida = entrada
65 URHs	32	0.52	0.05	1.09	0.5	0.5	1	Salida = entrada
153 URHs	76	0.33	0.03	1.02	0.5	0.5	1	Salida = entrada

Nota. Elaboración propia a partir de los parámetros de tránsito de caudales configurados en HEC-HMS mediante el método Muskingum.

Tabla D4

Resumen del tiempo de retardo y configuración del hidrograma unitario SCS por escenario de discretización

Escenario	Umbral *Area to Define Streams* (km²)	t_{lag} promedio (h)	t_{lag} mínimo–máximo (h)	Tipo de hidrograma	PRF
3 URHs	500	5.51	5.04–6.13	Standard	484
5 URHs	200	4.38	3.47–5.37	Standard	484
9 URHs	150	3.27	1.86–5.04	Standard	484
17 URHs	85	2.48	0.90–3.62	Standard	484
35 URHs	55	1.97	0.12–2.99	Standard	484
65 URHs	25	1.56	0.12–2.69	Standard	484
153 URHs	10	1.06	0.10–2.43	Standard	484

Nota. El tiempo de retardo se calculó mediante tlag = 0.60Tc. Los valores se presentan en horas para facilitar la comparación entre escenarios, aunque fueron convertidos a minutos para su ingreso en el campo Lag Time de HEC-HMS. Los valores promedio, mínimos y máximos proceden de las Tablas C3, C6, C9, C12, C15, C18 y C21. El umbral Area to Define Streams representa el área de acumulación utilizada para iniciar la definición de los cauces y no corresponde necesariamente al área mínima de las URHs generadas. En todos los escenarios se mantuvieron el mismo DEM, el punto de salida en Sayán, el hidrograma estándar y el factor PRF igual a 484. Elaboración propia.

Anexo E. Resultados complementarios de simulación

El presente anexo reúne resultados complementarios derivados de las simulaciones hidrológicas realizadas en HEC-HMS para los escenarios de discretización espacial de 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs. La información presentada complementa los resultados principales expuestos en el Capítulo IV, incorporando resúmenes adicionales por periodo, año y escenario, sin repetir las figuras y tablas centrales de análisis. Estos resultados permiten ampliar la trazabilidad de las simulaciones y respaldar la comparación entre escenarios de discretización espacial.

Tabla E1

Relación de simulaciones hidrológicas ejecutadas en HEC-HMS

Año	Escenarios simulados	Periodo de simulación	Intervalo computacional	Variable de salida	Observación
2016	3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs	Enero-mayo	1 minuto	Caudal medio diario simulado (m^3/s)	Periodo húmedo evaluado
2017	3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs	Enero-mayo	1 minuto	Caudal medio diario simulado (m^3/s)	Periodo húmedo evaluado
2018	3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs	Enero-mayo	1 minuto	Caudal medio diario simulado (m^3/s)	Periodo húmedo evaluado

Nota. Elaboración propia a partir de las simulaciones ejecutadas en HEC-HMS.

Tabla E2

Fechas de ocurrencia de los caudales máximos simulados por escenario

Año	Escenario	Caudal máximo simulado (m^3/s)	Fecha de ocurrencia
2016	3 URHs	229.23	29/03/2016
2016	5 URHs	253.54	29/03/2016
2016	9 URHs	204.36	29/03/2016
2016	17 URHs	172.61	30/03/2016
2016	35 URHs	186.46	30/03/2016
2016	65 URHs	166.21	29/03/2016
2016	153 URHs	177.05	30/03/2016
2017	3 URHs	384.96	10/03/2017
2017	5 URHs	300.00	26/02/2017
2017	9 URHs	345.16	11/03/2017
2017	17 URHs	340.07	11/03/2017
2017	35 URHs	365.96	11/03/2017
2017	65 URHs	349.11	10/03/2017
2017	153 URHs	351.72	10/03/2017
2018	3 URHs	232.19	24/03/2018
2018	5 URHs	245.42	24/03/2018
2018	9 URHs	251.24	24/03/2018
2018	17 URHs	238.40	24/03/2018
2018	35 URHs	232.87	24/03/2018
2018	65 URHs	246.47	24/03/2018
2018	153 URHs	243.67	24/03/2018

Nota. Elaboración propia a partir de las series diarias de caudales simulados en HEC-HMS.

Tabla E3

Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2016

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	32.12	32.08	32.15	32.20	31.87	31.74	31.76
Febrero	34.50	35.77	36.19	33.46	33.27	34.34	40.53
Marzo	75.59	84.17	83.96	79.07	80.32	78.98	88.02
Abril	80.57	86.06	83.71	72.93	74.02	74.35	77.29
Mayo	37.62	39.53	38.57	33.08	33.97	33.85	35.43

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E4

Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2017

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	35.33	36.19	37.60	38.72	38.43	38.99	44.23
Febrero	115.91	119.24	135.20	134.70	137.11	134.33	143.96
Marzo	219.71	186.94	218.35	217.50	226.36	225.30	224.85
Abril	127.13	111.50	120.40	118.45	124.31	122.38	122.79
Mayo	97.98	92.21	96.88	92.70	96.14	95.34	96.75

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E5

Caudales medios mensuales simulados por escenario durante 2018

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	33.57	33.54	34.52	36.31	35.76	36.29	36.51
Febrero	61.47	62.17	57.58	49.99	50.74	52.44	53.82
Marzo	99.15	110.03	102.11	94.74	97.93	97.09	97.10
Abril	83.58	94.44	89.74	85.44	89.09	87.48	86.24
Mayo	48.57	51.65	48.83	45.47	47.49	46.64	45.99

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E6

Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2016

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	86.03	85.93	86.11	86.23	85.35	85.01	85.07
Febrero	86.44	89.62	90.67	83.85	83.37	86.04	101.54

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Marzo	202.47	225.44	224.88	211.78	215.12	211.54	235.74
Abril	208.83	223.08	216.98	189.03	191.87	192.73	200.34
Mayo	94.25	99.04	96.65	82.89	85.11	84.81	88.77

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E7

Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2017

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	94.62	96.94	100.70	103.71	102.92	104.43	118.46
Febrero	280.42	288.48	327.08	325.86	331.70	324.98	348.27
Marzo	588.48	500.71	584.82	582.54	606.27	603.45	602.25
Abril	329.51	289.00	312.08	307.03	322.22	317.21	318.26
Mayo	253.97	239.01	251.10	240.27	249.20	247.13	250.78

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E8

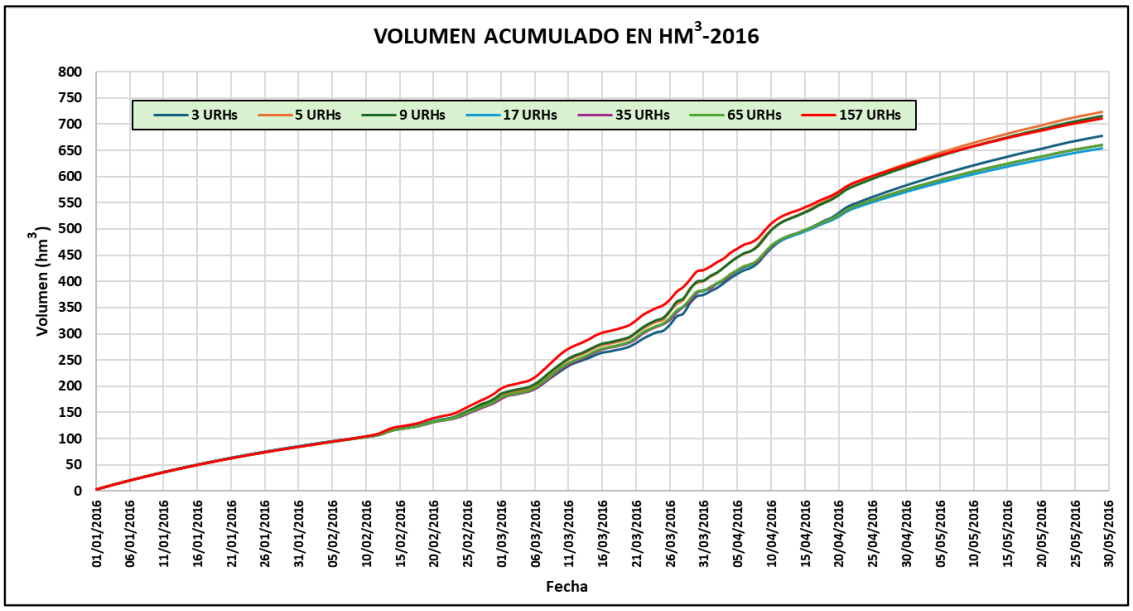
Volúmenes mensuales simulados en hm^3 por escenario durante 2018

Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs	153 URHs
Enero	89.91	89.82	92.47	97.24	95.78	97.21	97.78
Febrero	148.70	150.40	139.29	120.93	122.74	126.87	130.19
Marzo	265.57	294.71	273.49	253.76	262.28	260.03	260.06
Abril	216.65	244.80	232.60	221.46	230.93	226.75	223.53
Mayo	125.88	133.88	126.57	117.85	123.10	120.89	119.21

Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Figura E1

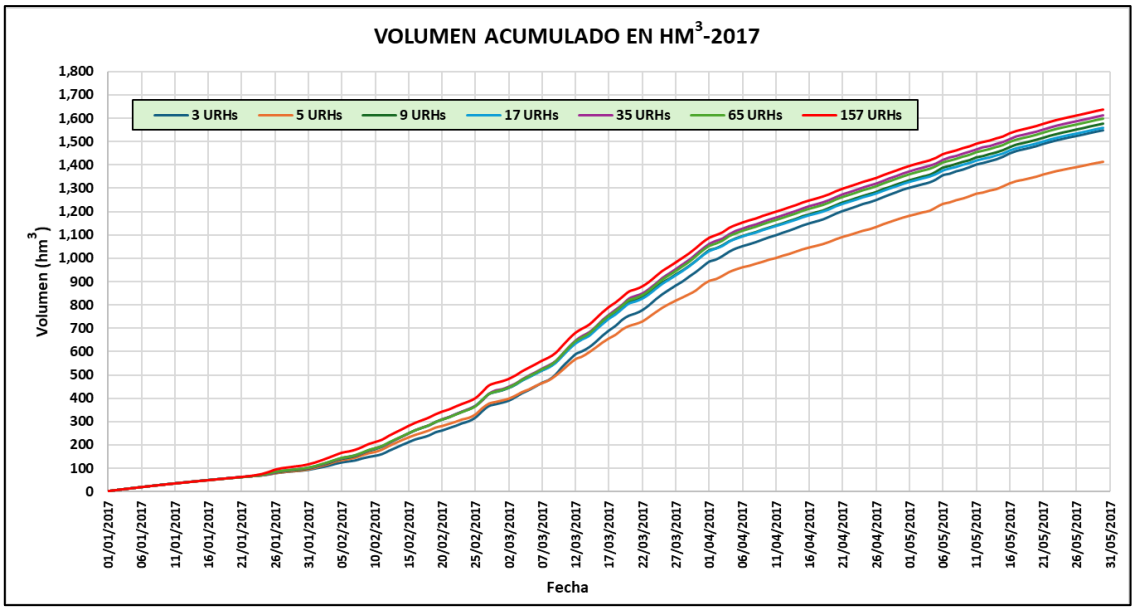
Curvas de volumen acumulado simulado durante 2016



Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Figura E2

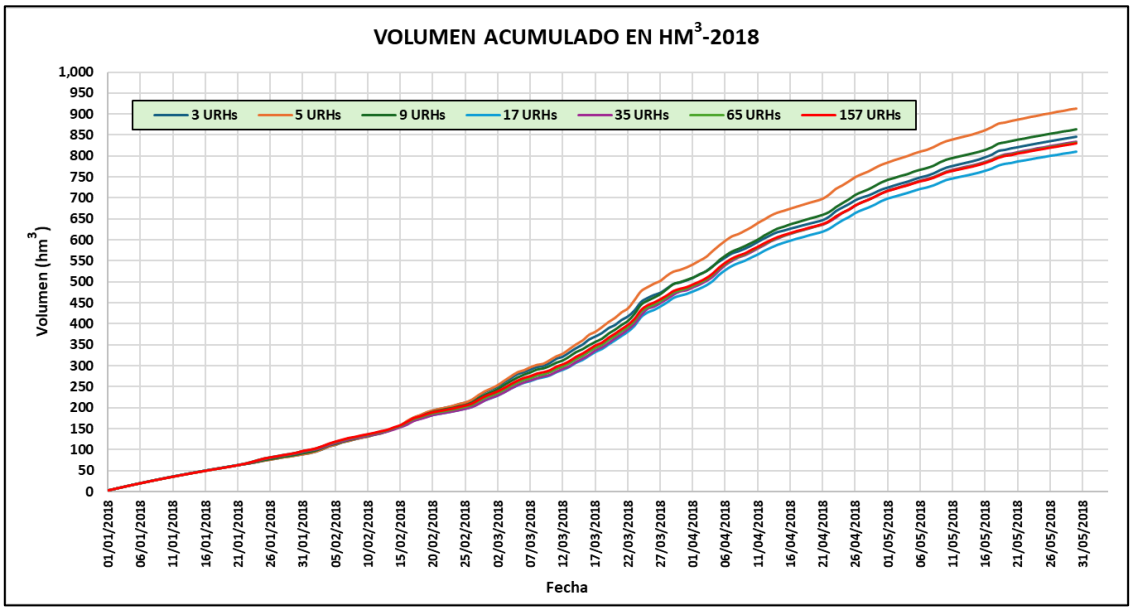
Curvas de volumen acumulado simulado durante 2017



Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Figura E3

Curvas de volumen acumulado simulado durante 2018



Nota. Elaboración propia a partir de los caudales diarios simulados en HEC-HMS.

Tabla E9

Diferencia porcentual mensual de los volúmenes simulados respecto al escenario de 153 URHs

Año	Mes	3 URHs	5 URHs	9 URHs	17 URHs	35 URHs	65 URHs
2016	Enero	1.13 %	1.01 %	1.23 %	1.37 %	0.33 %	-0.07 %
2016	Febrero	-14.87 %	-11.74 %	-10.71 %	-17.43 %	-17.90 %	-15.26 %
2016	Marzo	-14.12 %	-4.37 %	-4.61 %	-10.17 %	-8.75 %	-10.27 %
2016	Abril	4.24 %	11.35 %	8.30 %	-5.65 %	-4.23 %	-3.80 %
2016	Mayo	6.18 %	11.56 %	8.87 %	-6.62 %	-4.13 %	-4.47 %
2017	Enero	-20.12 %	-18.16 %	-14.99 %	-12.45 %	-13.12 %	-11.84 %
2017	Febrero	-19.48 %	-17.17 %	-6.09 %	-6.43 %	-4.76 %	-6.69 %
2017	Marzo	-2.29 %	-16.86 %	-2.89 %	-3.27 %	0.67 %	0.20 %
2017	Abril	3.53 %	-9.19 %	-1.94 %	-3.53 %	1.24 %	-0.33 %
2017	Mayo	1.27 %	-4.70 %	0.13 %	-4.19 %	-0.63 %	-1.46 %
2018	Enero	-8.05 %	-8.13 %	-5.43 %	-0.55 %	-2.04 %	-0.58 %
2018	Febrero	14.21 %	15.52 %	6.99 %	-7.11 %	-5.72 %	-2.55 %
2018	Marzo	2.12 %	13.33 %	5.16 %	-2.42 %	0.86 %	-0.01 %
2018	Abril	-3.08 %	9.51 %	4.06 %	-0.93 %	3.31 %	1.44 %
2018	Mayo	5.60 %	12.30 %	6.17 %	-1.14 %	3.26 %	1.41 %

Nota. Elaboración propia a partir de los volúmenes mensuales simulados en HEC-HMS. La

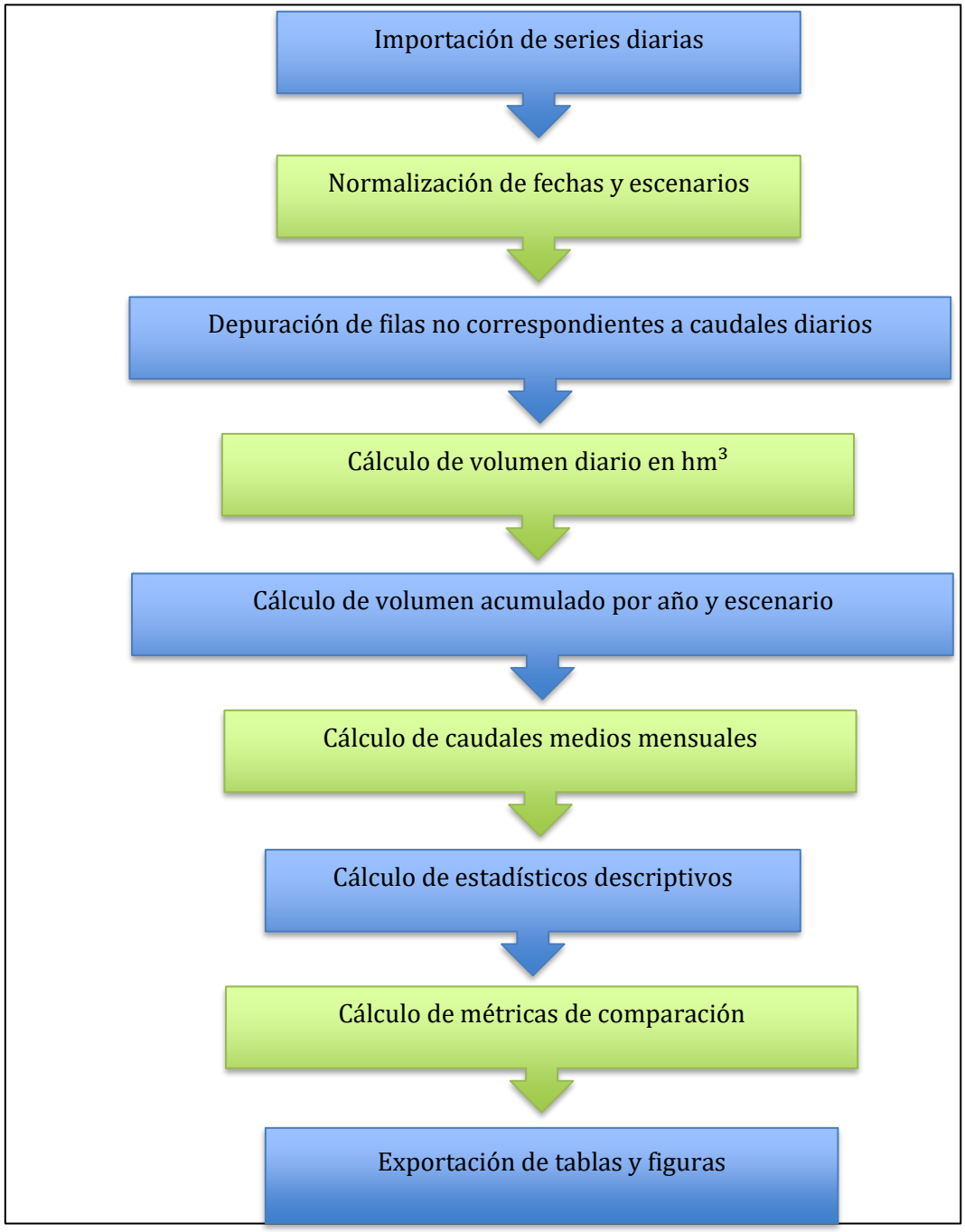
diferencia porcentual fue calculada respecto al escenario de 153 URHs, considerado como referencia interna de mayor discretización espacial. Los valores positivos indican volúmenes superiores al escenario de referencia, mientras que los valores negativos indican volúmenes inferiores.

Anexo F. Cálculos estadísticos y procesamiento en Python

El presente anexo describe el procesamiento estadístico y computacional realizado en Python para organizar, depurar y analizar las series diarias de caudales simulados obtenidas en HEC-HMS. Se presentan los principales archivos de entrada y salida, las variables generadas, los criterios de limpieza de datos y la trazabilidad de los cálculos empleados para obtener caudales máximos, volúmenes mensuales, volúmenes acumulados, estadísticos descriptivos y métricas de comparación entre escenarios de discretización espacial.

Figura F1

Flujo de procesamiento estadístico realizado en Python



Nota. Elaboración propia a partir del flujo de procesamiento estadístico desarrollado en Python.

Tabla F1

Archivos de entrada y salida empleados en el procesamiento estadístico

Tipo de archivo	Nombre o descripción	Contenido	Uso dentro del procesamiento
Entrada	Series diarias simuladas 2016	Caudales diarios por escenario	Cálculo de estadísticos, volúmenes y métricas
Entrada	Series diarias simuladas 2017	Caudales diarios por escenario	Cálculo de estadísticos, volúmenes y métricas
Entrada	Series diarias simuladas 2018	Caudales diarios por escenario	Cálculo de estadísticos, volúmenes y métricas
Entrada	Serie observada Sayán	Caudales diarios observados	Contraste hidrométrico complementario
Salida	Tabla de caudales máximos	Q máximo por año y escenario	Capítulo IV y Anexo E
Salida	Tabla de volúmenes mensuales	Volúmenes en hm^3 por mes y escenario	Anexo E
Salida	Tabla de volúmenes acumulados	Volumen acumulado diario en hm^3	Anexo E
Salida	Tabla de métricas estadísticas	Indicadores de comparación	Capítulo IV

Nota. Elaboración propia a partir de los archivos utilizados y generados durante el procesamiento en Python.

Tabla F2

Variables generadas durante el procesamiento de las series diarias

Variable generada	Unidad	Descripción	Uso posterior
Fecha	día/mes/año	Fecha del registro diario	Organización temporal de las series
Año	año	Año hidrológico evaluado	Agrupación anual
Mes	mes	Mes correspondiente a cada registro	Cálculo de promedios y volúmenes mensuales
Escenario	URHs	Nivel de discretización espacial evaluado	Comparación entre escenarios
Q_simulado	m^3/s	Caudal diario simulado en HEC-HMS	Base para todos los cálculos
Q_observado	m^3/s	Caudal diario registrado en Sayán	Contraste hidrométrico complementario
Volumen_diario	hm^3	Volumen diario calculado a partir del caudal simulado	Cálculo de volúmenes mensuales y acumulados
Volumen_acumulado	hm^3	Sumatoria progresiva del volumen diario	Elaboración de curvas acumuladas
Diferencia_153	m^3/s o hm^3	Diferencia respecto al escenario de 153 URHs	Evaluación de sensibilidad
Diferencia_porcentual_153	%	Diferencia relativa respecto al escenario de 153 URHs	Comparación mensual y por escenario

Nota. Elaboración propia a partir de las variables creadas durante el procesamiento estadístico en Python.

Tabla F3

Criterios de depuración y validación aplicados a las series de caudales

Criterio aplicado	Descripción	Justificación
Validación de fechas	Se verificó que las fechas correspondan al periodo enero-mayo de cada año	Evitar registros fuera del periodo de simulación
Revisión de valores faltantes	Se identificaron campos vacíos o registros incompletos	Evitar cálculos estadísticos con datos incompletos
Exclusión de filas no diarias	Se excluyeron filas finales correspondientes a volúmenes acumulados	No representan caudales diarios simulados
Conversión de formato	Se organizó la base en formato largo por fecha, año, mes y escenario	Facilitar agrupaciones mensuales y anuales
Verificación de máximos	Se contrastaron los caudales máximos calculados con las tablas de resultados	Asegurar consistencia con el Capítulo IV
Verificación de volúmenes	Se comprobó que la suma mensual y acumulada sea coherente con los volúmenes totales	Asegurar trazabilidad de los cálculos hidrológicos
Redondeo final	Los resultados fueron redondeados a dos decimales para presentación	Mejorar legibilidad de tablas y figuras

Nota. Elaboración propia a partir de los controles de calidad aplicados durante el procesamiento de las series diarias.

Tabla F4

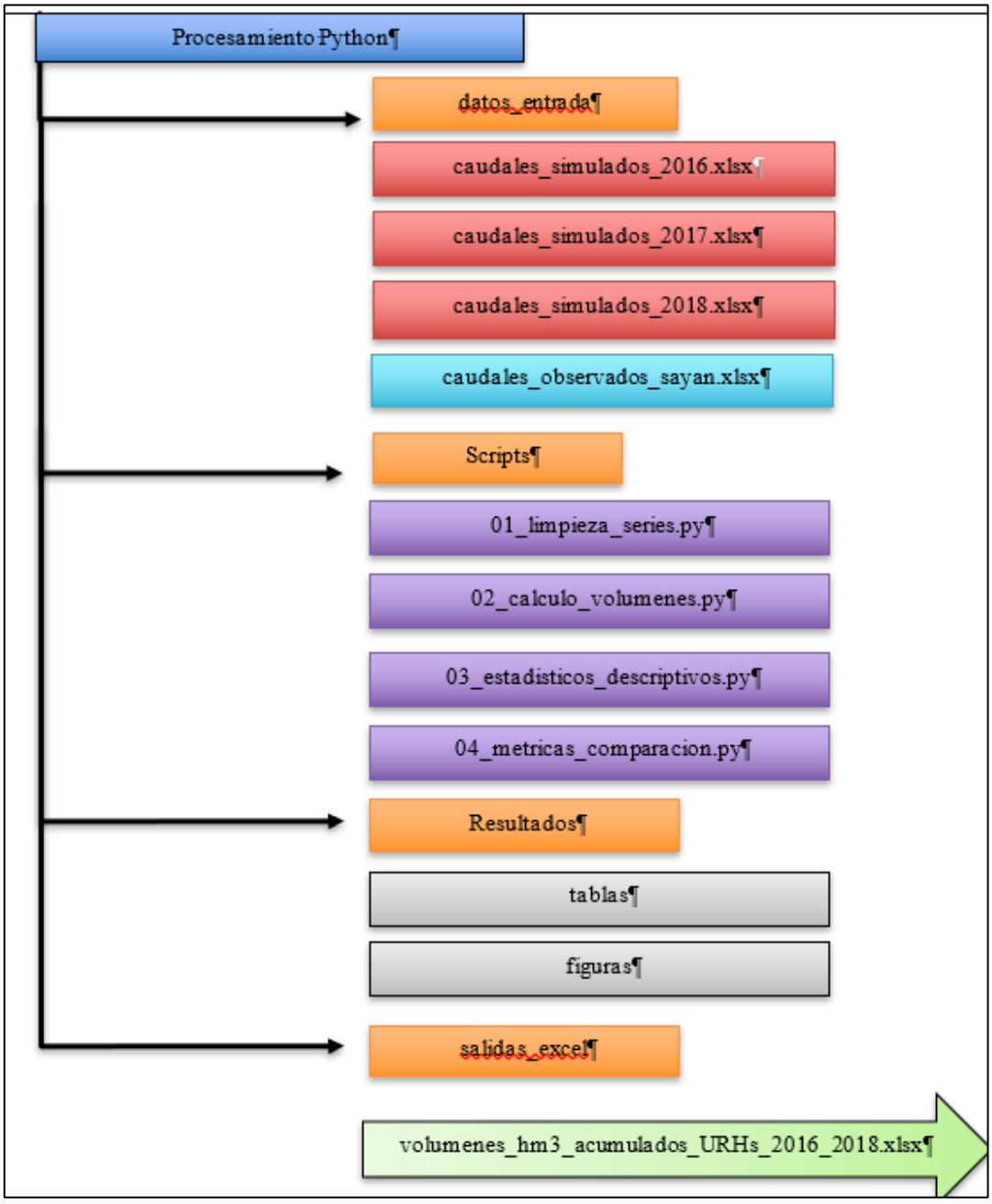
Correspondencia entre cálculos realizados en Python y productos presentados en la tesis

Cálculo realizado en Python	Producto generado	Ubicación en la tesis
Máximo de caudal diario por escenario	Caudales máximos simulados	Capítulo IV y Anexo E
Promedio mensual de caudal simulado	Caudales medios mensuales	Anexo E
Sumatoria diaria de volumen	Volúmenes mensuales en hm^3	Anexo E
Suma acumulada del volumen diario	Volúmenes acumulados en hm^3	Anexo E
Estadísticos descriptivos	Media, mediana, percentiles y máximos	Capítulo IV
Comparación con estación Sayán	Contraste hidrométrico complementario	Capítulo IV
Comparación con 153 URHs	Métricas de sensibilidad espacial	Capítulo IV
Diferencia porcentual respecto a 153 URHs	Diferencia porcentual mensual	Anexo E

Nota. Elaboración propia a partir de los cálculos realizados en Python y su correspondencia con los productos finales de la investigación.

Figura F2

Estructura de organización de archivos del procesamiento en Python



Nota. Elaboración propia a partir de la organización de archivos utilizada para el procesamiento de las series hidrológicas.

Anexo G. Matriz de alineamiento metodológico

Tabla G1

Matriz de alineamiento entre problema, objetivos, hipótesis, procedimientos, resultados y conclusiones

Nivel de alineamiento	Problema u objetivo vinculado	Relación con la hipótesis	Procedimiento desarrollado	Resultado o evidencia identificable	Conclusión correspondiente
General	Problema general: ¿De qué manera influye el nivel de discretización espacial en URHs en la generación de caudales naturales diarios simulados de la cuenca del río Huaura mediante HEC-HMS v.4?13.0? Objetivo general: Evaluar dicha influencia mediante un análisis comparativo y estadístico entre escenarios.	La discretización genera variaciones en los caudales diarios simulados, pero estas tienden a reducirse en los escenarios de mayor detalle, evidenciando una estabilización de la respuesta hidrológica con comportamiento no monotónico.	Se configuraron siete escenarios: 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs. Se utilizaron criterios homogéneos de modelamiento para enero-mayo de 2016, 2017 y 2018. Se compararon hidrogramas, caudales, volúmenes y métricas respecto a 153 URHs.	El número de URHs modificó los caudales, hidrogramas y volúmenes. Sin embargo, las diferencias disminuyeron en los escenarios de mayor discretización, especialmente entre 65 y 153 URHs.	Los resultados respaldan la hipótesis para los periodos y condiciones evaluados. La discretización influyó en la respuesta hidrológica simulada, pero su efecto no aumentó proporcionalmente con el número de URHs. Este respaldo provino de las comparaciones interescenario y no de una prueba de exactitud frente a caudales naturales observados.
Objetivo específico 1	Delimitar y caracterizar las URHs utilizando DEM, uso y cobertura del suelo, CN y parámetros morfométricos para establecer los escenarios de discretización.	Proporciona los niveles de la variable independiente necesarios para contrastar la hipótesis general. No se formuló una hipótesis específica independiente.	Se empleó el mismo DEM y punto de salida en Sayán. Se modificó Area to Define Streams mediante umbrales de 500, 200, 150, 85, 55, 25 y 10 km². Se determinaron área, pendiente, elevación, CN y parámetros morfométricos.	Se generaron siete escenarios conformados por 3, 5, 9, 17, 35, 65 y 153 URHs, con niveles progresivos de detalle espacial. La evidencia se presenta en la tabla de características generales y en el Anexo C.	Se delimitaron y caracterizaron satisfactoriamente los siete escenarios, permitiendo representar diferentes niveles de detalle de la misma cuenca.
Objetivo específico 2	Procesar y evaluar la calidad y consistencia de los datos diarios de precipitación y caudal empleados en el modelamiento.	Garantiza que las diferencias entre escenarios no sean consecuencia de datos	Se verificaron fechas, continuidad, disponibilidad, valores faltantes y posibles	Cada estación presentó 152 registros para 2016, 151 para 2017 y 151 para 2018: 454 registros diarios, 100 % de	Las series empleadas proporcionaron entradas completas y temporalmente homogéneas. Sayán se mantuvo

Nivel de alineamiento	Problema u objetivo vinculado	Relación con la hipótesis	Procedimiento desarrollado	Resultado o evidencia identificable	Conclusión correspondiente
		faltantes o periodos diferentes. Constituye soporte de la hipótesis general.	valores atípicos. Se procesaron las estaciones Andajes, Oyón, Paccho, Pachamachay, Pampa Libre y Parquín, además de Sayán como referencia complementaria.	disponibilidad y ausencia de datos faltantes en los periodos simulados.	únicamente como referencia hidrométrica complementaria.
Objetivo específico 3	Configurar y ejecutar en HEC-HMS v.4.13.0 los modelos semidistribuidos correspondientes a los siete escenarios.	Permite generar las respuestas hidrológicas necesarias para contrastar la hipótesis general. No se formuló una hipótesis específica independiente.	Se aplicaron SCS-CN para pérdidas, Hidrograma Unitario del SCS para transformación, Recession para flujo base y Muskingum para tránsito. Cada escenario fue ejecutado para 2016, 2017 y 2018 bajo procedimientos homogéneos.	Se completaron 21 casos de simulación: siete escenarios en tres periodos. Para cada caso se obtuvieron caudales naturales diarios simulados, hidrogramas y volúmenes.	Los modelos fueron configurados y ejecutados bajo criterios comparables, permitiendo atribuir las diferencias principalmente al nivel de discretización espacial.
Objetivo específico 4	Comparar los caudales diarios simulados mediante hidrogramas, caudales máximos, estadísticos, volúmenes y métricas respecto al escenario de 153 URHs.	Realiza la contrastación cuantitativa directa de la hipótesis general.	Se calcularon media, mediana, percentiles, caudal máximo, volumen, MAE, MRAE, RMSE, sesgo medio, Pearson y Spearman. El escenario de 153 URHs se utilizó como referencia interna, sin considerarlo una verdad observada.	Para 65 frente a 153 URHs, el MRAE fue 7.60 %, 3.95 % y 2.97 % en 2016, 2017 y 2018. Pearson fue 0.992, 0.996 y 0.997; Spearman fue 0.987, 0.987 y 0.996.	Los escenarios de mayor discretización presentaron alta similitud. Las diferencias existieron, pero presentaron una tendencia general hacia menores diferencias, con oscilaciones no monotónicas en los escenarios de mayor detalle.
Objetivo específico 5	Evaluar la influencia de la discretización en la estabilidad y	Evalúa específicamente la segunda parte de la	Se analizó la evolución de las métricas, caudales	Los escenarios de menor discretización mostraron	Después de determinado nivel de detalle, el incremento del número de

Nivel de alineamiento	Problema u objetivo vinculado	Relación con la hipótesis	Procedimiento desarrollado	Resultado o evidencia identificable	Conclusión correspondiente
	consistencia de la respuesta hidrológica simulada.	hipótesis: la estabilización de la respuesta hidrológica con comportamiento no monotónico de los resultados.	y volúmenes conforme aumentó el número de URHs, considerando 153 URHs como referencia interna de mayor detalle.	mayores diferencias. Entre 65 y 153 URHs se identificaron diferencias reducidas y elevada similitud temporal en los tres periodos.	URHs produjo beneficios marginales reducidos. Esta conclusión se limita a los métodos, datos y periodos evaluados.
Contraste hidrométrico complementario	Se vincula transversalmente con el objetivo general y con los objetivos específicos 2 y 4.	No constituye la contrastación principal de la hipótesis ni una validación hidrométrica estricta.	Se compararon los escenarios simulados con Sayán mediante Pearson, Spearman, NSE y PBIAS.	Se encontró asociación temporal, especialmente en 2017 y 2018, pero también diferencias importantes de magnitud, expresadas mediante NSE negativos y PBIAS alejados de cero.	Sayán permitió contextualizar los resultados, pero no determinar la exactitud absoluta del modelo debido a la posible regulación hidráulica aguas arriba.