

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.364>

Modelado Hidrológico para la Simulación de Caudales Máximos y Producción de Sedimentos en la Cuenca Yanango mediante HEC-HMS

Juriko Sofia Vicente Cisinaro

jsvicentecisinaro@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-3847-0554>Universidad Nacional Agraria la Molina
Perú

Gonzalo Ramces Fano Miranda

gfono16@gmail.com<https://orcid.org/0000-0002-4401-8654>Universidad Nacional Agraria la Molina
Perú

RESUMEN

El colapso histórico de infraestructuras clave, como el puente Yanango en Chanchamayo (Perú), expone una vulnerabilidad crítica en la gestión de la cuenca: la falta de modelos predictivos que cuantifiquen la respuesta hidrológica y la producción de sedimentos durante eventos extremos. Este estudio aborda dicha limitación mediante la modelación de la cuenca Yanango para diversos períodos de retorno (TR) utilizando HEC-HMS. Se implementó un modelo hidrológico semidistribuido (12 subcuencas) que integra los métodos SCS-CN (pérdidas), Hidrograma Unitario SCS (transformación) y Muskingum-Cunge (tránsito), acoplado con los factores RUSLE para el cómputo de sedimentos. El modelo fue calibrado mediante el ajuste de los valores de CN hasta replicar el caudal de referencia (202.35 m³/s) para un TR de 200 años, establecido por el MTC (2013). Los resultados finales indican una severa producción de sedimentos, alcanzando 213.6 tn/ha/año en el punto de descarga (Tramo G) para el mismo período de retorno. Se concluye que el modelo HEC-HMS es una herramienta robusta para el pronóstico de riesgos y que la infraestructura de la cuenca, especialmente aquella localizada agua abajo está expuesta a un riesgo crítico de colmatación.

Palabras clave: HEC-HMS, modelado hidrológico, producción de sedimentos, cuenca yanango, gestión de riesgos



Hydrological Modeling for the Simulation of Peak Flows and Sediment Yield in the Yanango Watershed using HEC-HMS

ABSTRACT

The historical collapse of key infrastructure, such as the Yanango bridge in Chanchamayo (Peru), exposes a critical vulnerability in watershed management: the lack of predictive models that quantify the hydrological response and sediment production during extreme events. This study addresses this limitation by modeling the Yanango watershed for various return periods (TR) using HEC-HMS. A semi-distributed hydrological model (12 sub-basins) was implemented, integrating the SCS-CN (losses), SCS Unit Hydrograph (transform), and Muskingum-Cunge (routing) methods, coupled with RUSLE factors for sediment computation. The model was calibrated by adjusting CN values to replicate the reference discharge (202.35 m³/s) for a 200-year TR, as established by the MTC (2013). Final results indicate severe sediment production, reaching 213.6 tn/ha/year at the outlet (Reach G) for the same return period. It is concluded that the HEC-HMS model is a robust tool for risk forecasting in the watershed and that the basin's infrastructure, especially that located downstream, is exposed to a critical risk of siltation.

Keywords: HEC-HMS, hydrological modeling, sediment yield, yanango watershed, risk management



INTRODUCCIÓN

La gestión de cuencas hidrográficas en regiones de alta montaña, como la Selva Alta peruana, presenta un desafío crítico: el manejo simultáneo de caudales líquidos extremos y una elevada producción de sedimentos. Eventos como el colapso del puente atirantado Yanango en 2005 evidencian esta problemática, donde las avenidas torrenciales y la colmatación por sólidos (provenientes de quebradas como Umanpaccha) superan sistemáticamente la capacidad de la infraestructura.

Este escenario subraya una limitación metodológica. Si bien la estimación de la pérdida de suelo (mediante modelos como RUSLE) es un primer paso fundamental, resulta insuficiente para la ingeniería de riesgos. Se requiere ir más allá de la cuantificación de la erosión estática en laderas y modelar la respuesta hidrológica dinámica, es decir, el transporte de sedimentos que fluye por el cauce principal durante eventos de máxima avenida. (Renard et al., 1997).

Para abordar esta brecha, este estudio emplea un modelamiento hidrológico semidistribuido. La herramienta central es HEC-HMS, seleccionada por su capacidad para simular integralmente los procesos de transformación lluvia-escurrimiento, la erosión y el transporte de sedimentos. Específicamente, el modelo integra la erosión potencial (obtenida de RUSLE) con el tránsito de avenidas (método Muskingum-Cunge) y el transporte de sedimentos (método de la velocidad de caída Toffaleti).

El trabajo posee una relevancia práctica directa, generando hidrogramas de diseño y tasas de sedimentación para diferentes períodos de retorno (TR). Esta información es indispensable para el diseño de infraestructura resiliente y la planificación de medidas de control de sedimentos. El objetivo general de este artículo es, por tanto, evaluar los caudales líquidos y sólidos y analizar la producción de sedimentos de la cuenca Yanango mediante la simulación hidrológica en HEC-HMS.

METODOLOGÍA

Enfoque, Diseño y Área de Estudio

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de tipo aplicativo. El diseño fue no experimental, basado en la simulación de un modelo hidrológico a partir de datos de entrada validados. La población de estudio fue la Cuenca Hidrográfica del Río Yanango (47.9 km²), ubicada en Chanchamayo, Junín. La unidad de



análisis fue la subcuenca, dividiendo el área en 12 subcuencas (SC-01 a SC-12) y 8 tramos de cauce para el tránsito de avenidas.

Para estimar la cantidad de sedimentos en la zona de estudio, se siguió el proceso metodológico detallado en la Figura 1, donde se muestran los pasos para modelar la erosión y el transporte sólido con el software HEC-HMS. La estructura de la cuenca, incluyendo las áreas de drenaje y los cauces, se observa en la Figura 2. Este esquema permite identificar cómo se mueven los sedimentos desde las partes altas hasta el punto final de salida, facilitando la ubicación de las zonas donde se acumula la mayor cantidad de material.

Figura 1: Flujograma para determinar la producción de sedimentos con HEC- HMS

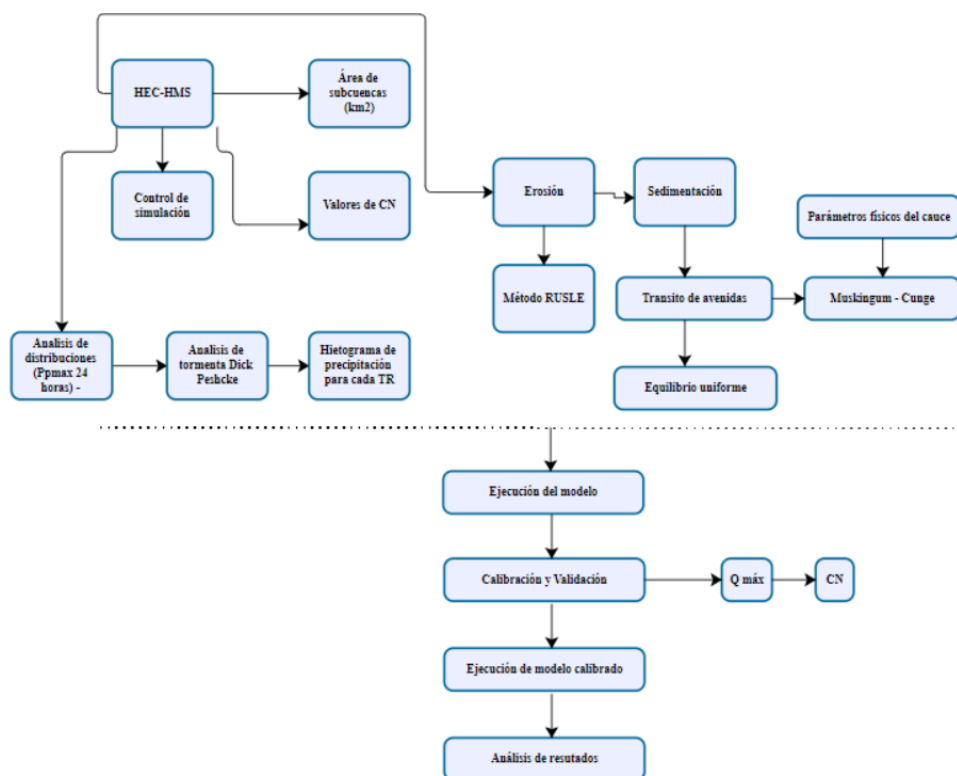
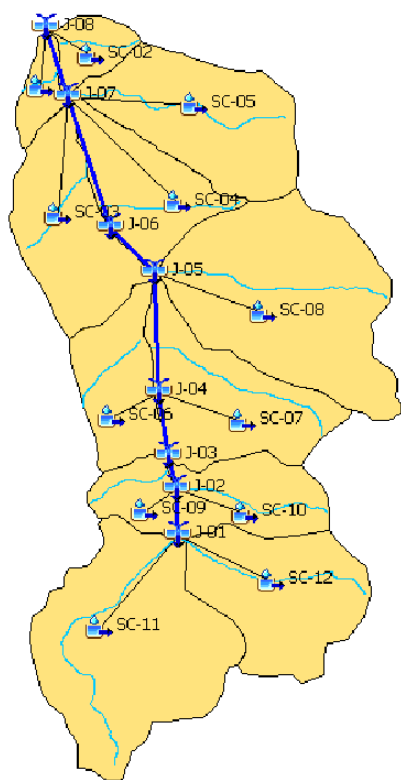


Figura 2: Esquema del Modelo de Cuenca en HEC-HMS



Configuración del Modelo Hidrológico (HEC-HMS)

Se configuró un modelo de cuenca en HEC-HMS 4.11 (Scharffenberg, 2023) seleccionando los métodos matemáticos para cada proceso hidrológico, como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1: Configuración del Modelo Hidrológico (HEC-HMS)

Proceso Modelado	Componente	Método Seleccionado	Parámetros Clave y Justificación de Uso
Hidrología			
Pérdidas (Infiltración)		Número de Curva de SCS (SCS-CN)	Valores de CN ajustados durante la calibración para igualar el caudal objetivo. Abstracción inicial definida como 0.2. (USDA-NRCS, 2004)
Transformación (Escorrentía)	Subcuenca	Hidrograma Unitario (SCS-UH)	Tiempo de Retardo (Lag Time) definido para cada subcuenca (basado en métodos empíricos o calibración).
Flujo Base		Ninguno (None)	El análisis se enfoca en la respuesta a eventos extremos (escorrentía directa), por lo que el flujo base no se simula.
Tránsito de Avenidas	Cauce	Muskingum-Cunge	Método de tránsito hidrodinámico que utiliza parámetros geométricos del canal (sección transversal, pendiente) y el 'n' de Manning. (Cunge, 1969).
Sedimentos			
Producción de Sedimentos	Subcuenca	RUSLE	Seleccionado por su capacidad para estimar la producción de sedimentos por evento. Utiliza los factores de RUSLE (K, C, P, LS) como entrada. (Renard et al., 1997).
Transporte de Sedimentos	Cauce	Toffaleti	Método empírico seleccionado para calcular la capacidad de transporte de sedimentos (especialmente carga de lecho y suspendida) basado en las propiedades hidráulicas del flujo en el cauce. (Toffaleti, 1968).



Parámetros de Entrada del Modelo

Los datos de entrada para el modelo se obtuvieron de fuentes cartográficas, estudios previos y análisis de campo:

Parámetros geomorfológicos

Los parámetros geomorfológicos que definen el comportamiento hidrológico de la zona de estudio se consolidan en la Tabla 2, donde se detallan las características de las subcuencas pertenecientes a Yanango. Esta información, que incluye variables críticas como el área, la pendiente media y la densidad de drenaje, permite caracterizar la respuesta de cada unidad frente a los eventos de precipitación y su potencial de aporte sólido al sistema. Asimismo, la inclusión de índices de forma y compacidad facilita la comprensión de la eficiencia del transporte de sedimentos desde las cabeceras hasta los puntos de control definidos en el modelo

Tabla 2: Parámetros Geomorfológicos de Sub-Cuencas pertenecientes a Yanango

Características de la Sub-Cuencas										
Nombre	Área (km ²)	Perímetro (km)	Pendiente media (m/m)	Factor de Forma	Índice de Compacidad	Longitud de Flujo (km)	Cota Menor (m.s.n.m)	Cota Mayor (m.s.n.m)	Pendiente del Cauce (%)	Densidad de Drenaje
SC-01	0.82	4.46	0.49	1.75	1.38	0.68	1822	2308	0.71	0.84
SC-02	1.07	4.46	0.51	0.68	1.21	1.26	1767	2642	0.7	1.17
SC-03	4.23	9.52	0.57	1.83	1.3	1.52	2153	3181	0.68	0.36
SC-04	3.25	8.58	0.53	0.63	1.33	2.27	2257	3330	0.47	0.7
SC-05	5.25	9.8	0.48	0.37	1.2	3.78	1895	3245	0.36	0.72
SC-06	2.83	8.12	0.49	1.37	1.35	1.44	2846	3650	0.56	0.51
SC-07	4.66	10.62	0.51	0.43	1.38	3.28	2852	3939	0.33	0.7
SC-08	8.52	12.32	0.71	0.58	1.18	3.82	2576	3597	0.27	0.45
SC-09	1.29	4.7	0.45	0.62	1.16	1.44	3265	3855	0.41	1.11
SC-10	2.64	7.42	0.48	0.4	1.28	2.56	3304	3890	0.23	0.97
SC-11	8.42	12.5	0.4	0.33	1.21	5.05	3420	4216	0.16	0.6
SC-12	4.94	9.52	0.43	0.42	1.2	3.43	3422	3942	0.15	0.69



Parámetros de Cauce

El coeficiente de rugosidad del cauce principal es un parámetro hidráulico sensible, el cual cumple un papel importante en la modelación hidráulica ya que hace variar el comportamiento del cauce durante la modelación. Para poder estimar este parámetro se eligió el método visual que fue validado con bibliografía y estudios realizados en la zona como “Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas) (Villón, 2011) y “Estudio Definitivo para la construcción del túnel Yanango y accesos” (MTC, 2013).

Utilizando el software AutoCAD Civil 3D 2022 y datos topográficos obtenidos del Modelo Digital de Elevación (DEM), se llevó a cabo el alineamiento del cauce de la quebrada Yanango con el objetivo de determinar la pendiente media mediante el método de Taylor & Schwarz. Se consideraron un total de 8 tramos (Ver Tabla 3 y Tabla 4), tomando como punto de partida la cabecera de la cuenca.

Tabla 3: Propiedades físicas o geométricas del río Yanango

Nombre	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Talud (H:V)
Tramo-A	606	0.08	5:1
Tramo-B	803	0.09	3.5:1
Tramo-C	906	0.11	5:1
Tramo-D	2069	0.13	2:1
Tramo-E	1285	0.14	2:1
Tramo-F	2285	0.15	3:1
Tramo-G	1231	0.12	3.5:1



Tabla 4: Datos Técnicos de tramos pertenecientes al río Yanango

Nombre	Progresiva Inicial (km)	Progresiva Final (km)	Longitud (m)	Pendiente (m/m)
Tramo-A	9+385.39	8+779.74	606	0.08
Tramo-B	8+779.74	7+976.88	803	0.09
Tramo-C	7+976.88	7+071.21	906	0.11
Tramo-D	7+071.21	5+001.87	2069	0.13
Tramo-E	5+001.87	3+717.20	1285	0.14
Tramo-F	3+717.20	1+231.32	2285	0.12
Tramo-G	1+231.32	0+000.00	1231	0.12

Para determinar el ancho estable del cauce se consideraron cuatro métodos empíricos y la recomendación practica sugerida por la Autoridad Nacional de Agua (ANA), para los caudales correspondientes a los distintos periodos de retorno. (Ver Tabla 5)

Tabla 5: Cálculo del ancho estable del cauce

Método	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 25 años	TR= 50 años	TR= 100 años	TR= 200 años
B (m)						
Altunin	27.74	30.05	34.32	36.25	38.24	40.28
Blench	43.5	47.13	53.82	56.85	59.97	63.16
Petis	43.57	47.2	53.9	56.93	60.05	63.25
Simmons y Henderson	28.46	30.83	35.2	37.19	39.22	41.31
Recomendación - ANA	13.48	15.82	20.63	23.02	25.61	28.41
Ancho mínimo	13.48	15.82	20.63	23.02	25.61	28.41
Ancho máximo	43.57	47.2	53.9	56.93	60.05	63.25
Promedio	31.35	34.21	39.58	42.05	44.62	47.28



Parámetros de Subcuenca (SCS)

Los valores iniciales de Número de Curva (CN) se obtuvieron del mapa de CN de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015). Los tiempos de retardo (*Lag Time*) y la abstracción inicial (*Initial Abstraction*) se calcularon para cada subcuenca y se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores de ingreso para método SCS Curva número y SCS hidrograma unitario

Subcuencas	Longitud de flujo (m)	Cota superior (m s.n.m)	Cota inferior (m s.n.m)	Pendiente promedio (%)	CN	Abstracción inicial (mm)	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)
SC-01	685	2308	1822	71	81	11.92	6.98	4.19
SC-02	1257	2642	1767	70	81	11.92	11.46	6.87
SC-03	1520	3181	2153	68	78.71	13.74	14.54	8.72
SC-04	2266	3330	2257	47	77.06	15.13	25.13	15.08
SC-05	3779	3245	1895	36	76.43	15.67	44.37	26.62
SC-06	1440	3650	2846	56	74.02	17.83	17.59	10.55
SC-07	3284	3939	2852	33	80.19	12.55	36.76	22.06
SC-08	3820	3597	2576	27	75.03	16.91	53.9	32.34
SC-09	1439	3855	3265	41	89.41	6.02	12.35	7.41
SC-10	2560	3890	3304	23	87.82	7.05	27.87	16.72
SC-11	5047	4216	3420	16	89.13	6.2	54.95	32.97
SC-12	3432	3942	3422	15	82.9	10.48	51.57	30.94

Datos Meteorológicos

Análisis de frecuencia y prueba de bondad de ajuste

Se realizó el análisis de frecuencia para determinar una función de distribución que represente el comportamiento probabilístico de cada estación. El Manual de Hidrología, hidráulica y drenaje por el MTC (2018) sugiere las siguientes distribuciones:

1. Distribución Normal
2. Distribución Log- Normal
3. Distribución Gumbel



4. Distribución Pearson tipo III
5. Distribución Log- Pearson tipo III

Los resultados mostraron que las estaciones Tarma, Ricrán, Huasahuasi, Comas y San Ramón se ajustan mejor a una distribución probabilística Log Pearson Tipo III; asimismo, la estación San Eloy de Singayac se ajusta mejor a una distribución probabilística Gumbel,

Todas las distribuciones seleccionadas se ajustaron a un nivel de significancia del 5 por ciento.

En la Tabla 7 se muestran los resultados del Test de Kolmogorov – Smirnov para cada estación pluviométrica.

Tabla 7: Resumen del Test Kolmogorov - Smirnov para las estaciones pluviométricas

Estación	Distribución Probabilística	Delta Calculado
Tarma	Log Pearson III	0.10
Ricran	Log Pearson III	0.13
Huasahuasi	Log Pearson III	0.07
Comas	Log Pearson III	0.13
San Eloy de Singayac	Gumbel	0.11
San Ramón	Log Pearson III	0.09

Precipitaciones para diferentes periodos de retorno

Con la función de distribución de mejor ajuste a los datos de Pp. Max 24 horas de cada estación, se procedió a determinar las precipitaciones para los diferentes periodos de retorno.

En la Tabla 8 se muestran las precipitaciones máximas en 24 horas para los periodos de retorno de 2, 5,10,25,50,100 y 200.

Tabla 8: Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno (TR)

Estación	Distribución Probabilística	Periodo de Retorno (TR)							
		2	5	10	25	50	100	200	500
Tarma	Log Pearson III	21.9	28.1	32.0	36.8	40.2	43.6	46.9	45.4
Ricran	Log Pearson III	20.3	25.0	28.2	32.1	35.0	38.0	41.0	39.8
Huasahuasi	Log Pearson III	23.8	27.9	30.5	33.9	36.4	39.0	41.6	45.1
Comas	Log Pearson III	24.5	30.9	36.8	46.3	55.0	65.5	77.9	98.0
San Eloy de Singayac	Gumbel	68.5	92.8	108.9	129.3	144.4	159.4	174.4	235.9
San Ramón	Log Pearson III	72.6	91.8	104.2	119.3	130.2	140.7	150.9	145.2



Lluvias máximas

Las alturas máximas de precipitación fueron determinadas empleando el método de Dick & Peschke, que implica descomponer los registros de precipitación máxima en un período de 24 horas para cada intervalo de tiempo.

Intensidad de lluvia

Se calcularon las intensidades de lluvia al realizar una operación de división entre las alturas máximas de precipitación y sus duraciones. Este procedimiento permitió obtener diferentes duraciones y periodos de retorno. Luego, se determinó las curvas I-D-F mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{k_x T^m}{t^n}$$

Para poder hallar los parámetros K, m y n, se realizó un análisis de regresión múltiple. En la Tabla 9 se puede apreciar los parámetros de ajuste y ecuaciones de curvas I-D-F para cada estación, y en base a ellas se puede determinar las curvas que se muestran en las Figuras del 3 a la 8.

Tabla 9: Ecuaciones de Curvas I-D-F

Estación	Parámetros de ajuste		
	k	m	n
Tarma	228.9	0.12	0.75
Ricran	203.5	0.12	0.75
Huasahuasi	232.9	0.10	0.75
Comas	201.0	0.25	0.75
San Eloy de Singayac	682.0	0.17	0.75
San Ramón	670.6	0.12	0.75

- Tarma: $I = \frac{(228.89xT^{0.12})}{t^{0.75}}$
- Ricran : $I = \frac{(203.5xT^{0.12})}{t^{0.75}}$
- Huasahuasi: $I = \frac{(232.9xT^{0.10})}{t^{0.75}}$
- Comas: $I = \frac{(201xT^{0.25})}{t^{0.75}}$
- San Eloy de Singayac : $I = \frac{(682xT^{0.17})}{t^{0.75}}$
- San Ramón: $I = \frac{(670.6xT^{0.12})}{t^{0.75}}$



Para la generación de los hietogramas de diseño, se adoptó una duración de tormenta de 24 horas, basada en los registros de precipitación máxima diaria de las estaciones analizadas. La distribución temporal de la precipitación se realizó mediante el Método del Bloque Alterno, empleando un intervalo de discretización (time step) de 1 hora. Para la desagregación de la lluvia, se utilizó la metodología de Dick & Peschke, permitiendo obtener la intensidad máxima en el bloque central de la tormenta sintética para los periodos de retorno (TR) de 2, 5, 25, 50, 100 y 200 años.

Figura 3: Curvas IDF - Estación Tarma

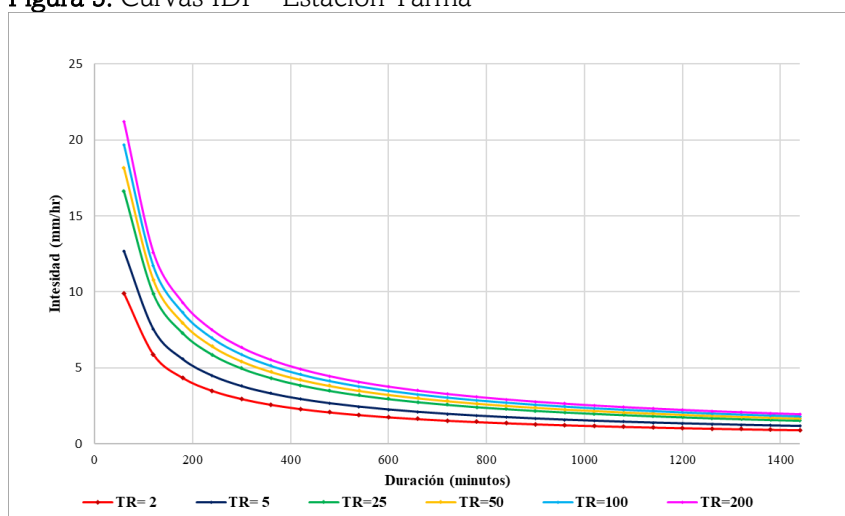


Figura 4: Curvas IDF - Estación Ricrán

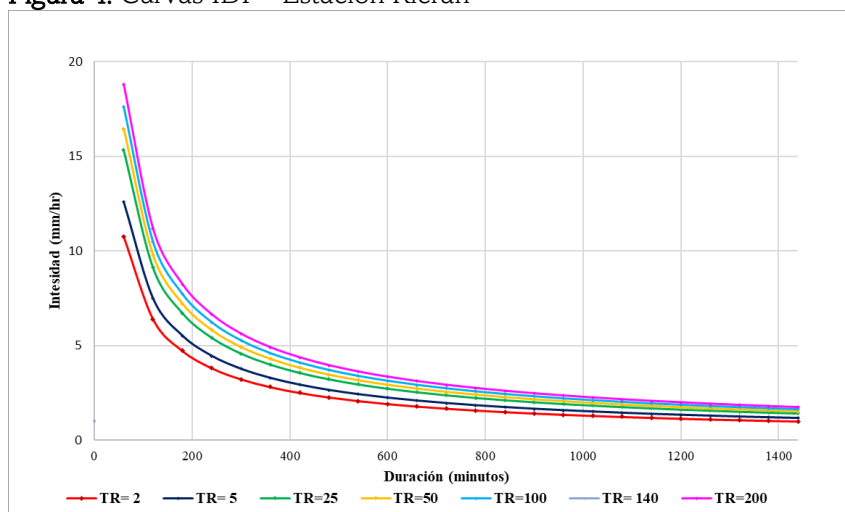


Figura 5: Curvas IDF - Estación Huasahuasi

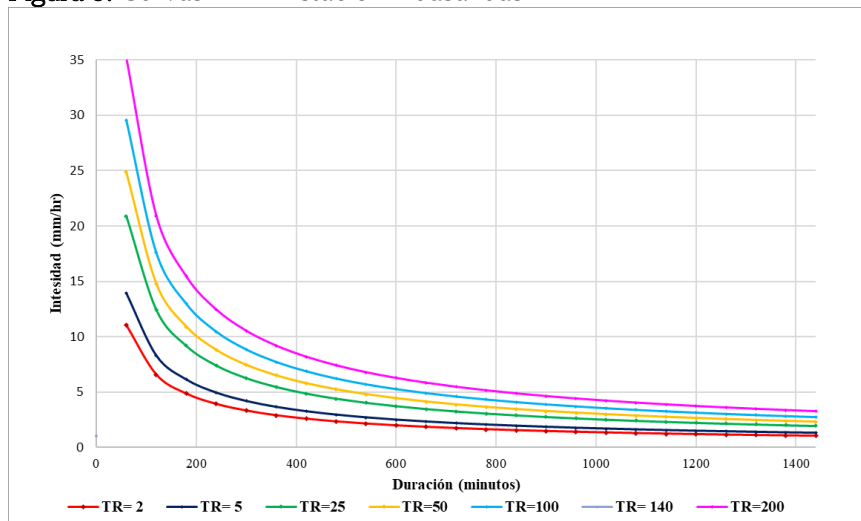


Figura 6: Curvas IDF - Estación Comas

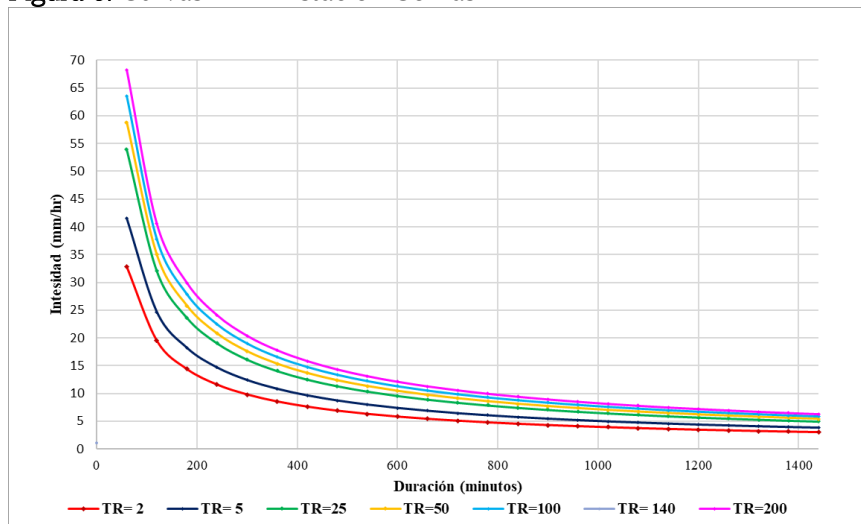


Figura 7: Curvas IDF - Estación San Eloy de Singayac

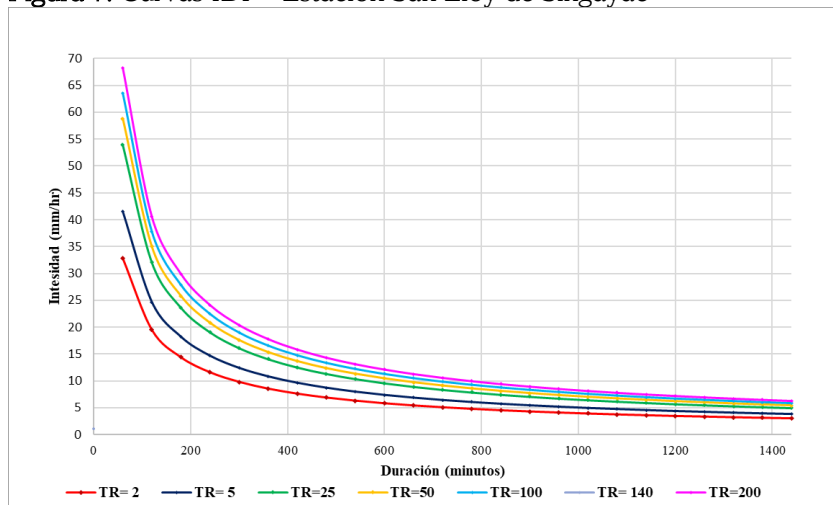
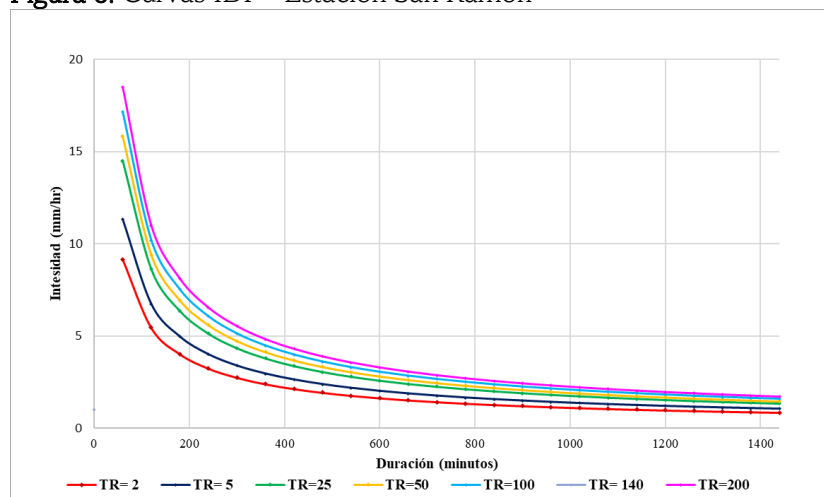


Figura 8: Curvas IDF - Estación San Ramón



Hietograma de precipitación de diseño

Los hietogramas de precipitación de diseño se muestran desde la Figura 9 a la Figura 14. La duración de la tormenta sintética es de 1440 minutos (24 horas), estructurada mediante el método de bloques para los diferentes tiempos de retorno.

Figura 9: Hietogramas para diferentes TR – Estación Tarma

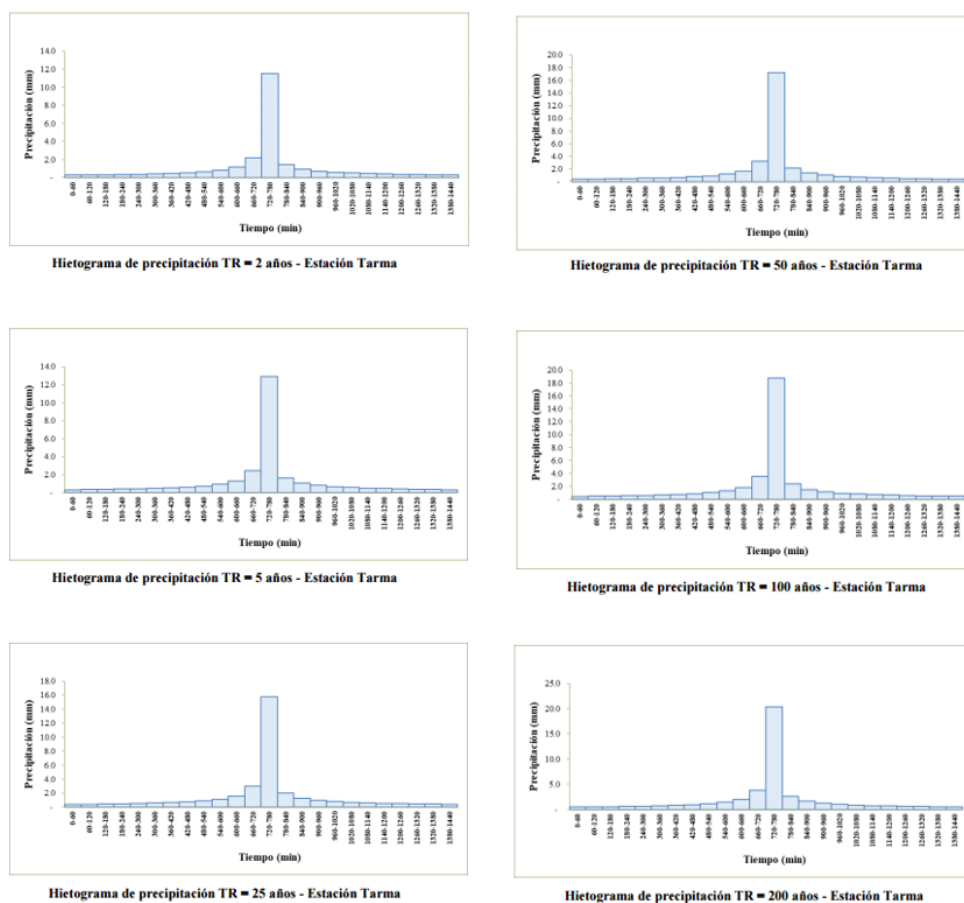
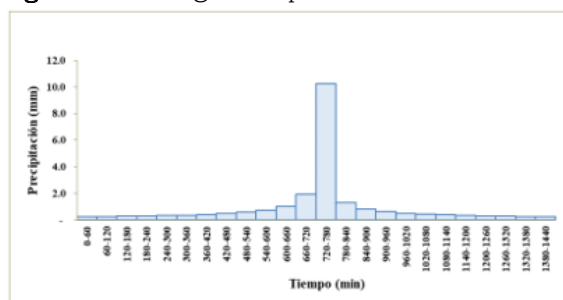
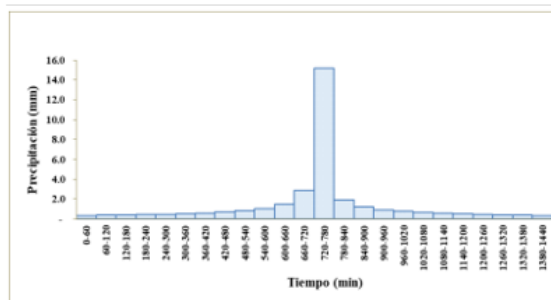


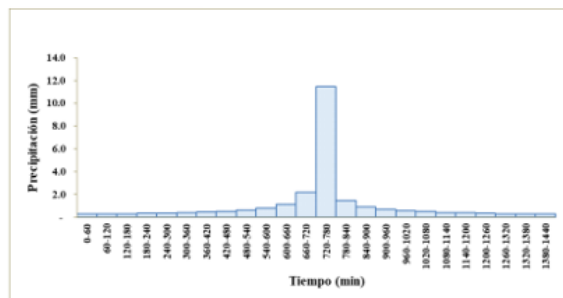
Figura 10: Hietogramas para diferentes TR – Estación Ricrán



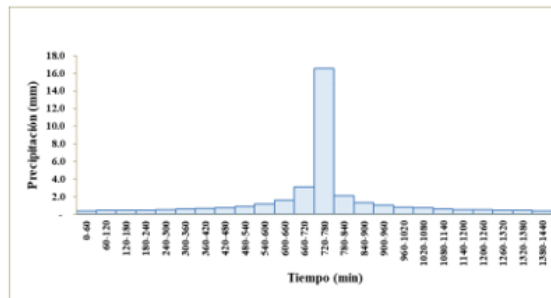
Hietograma de precipitación TR = 2 años - Estación Ricrán



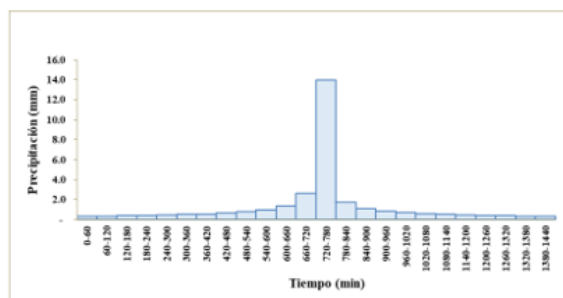
Hietograma de precipitación TR = 50 años - Estación Ricrán



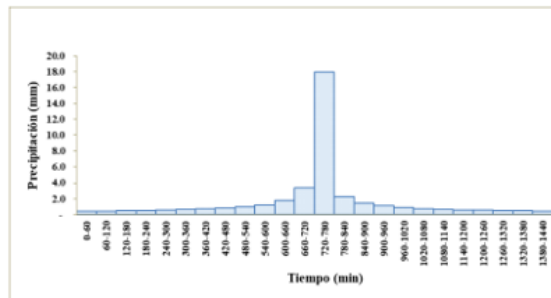
Hietograma de precipitación TR = 5 años - Estación Ricrán



Hietograma de precipitación TR = 100 años - Estación Ricrán



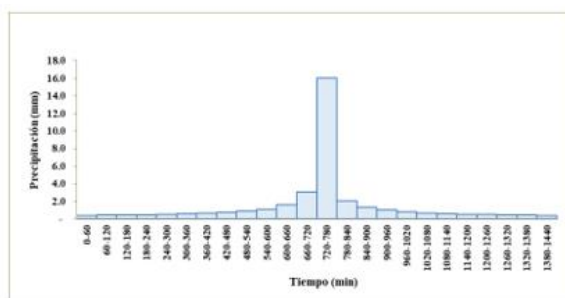
Hietograma de precipitación TR = 25 años - Estación Ricrán



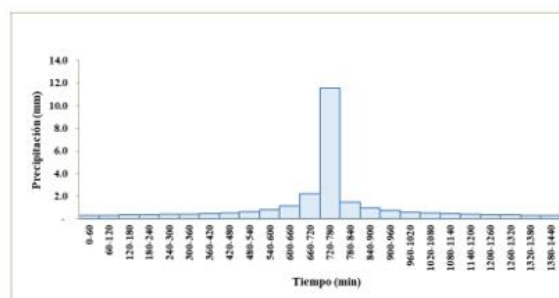
Hietograma de precipitación TR = 200 años - Estación Ricrán



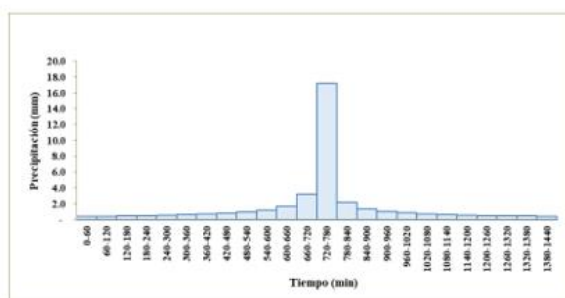
Figura 11: Hietogramas para diferentes TR – Estación Huasahuasi



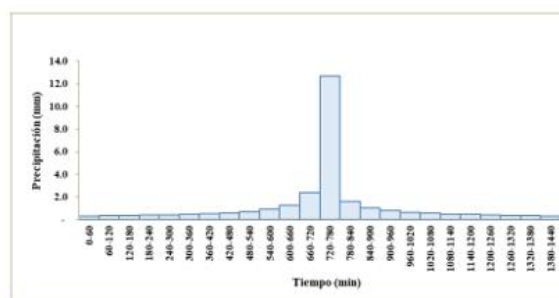
Hietograma de precipitación TR = 50 años - Estación Huasahuasi



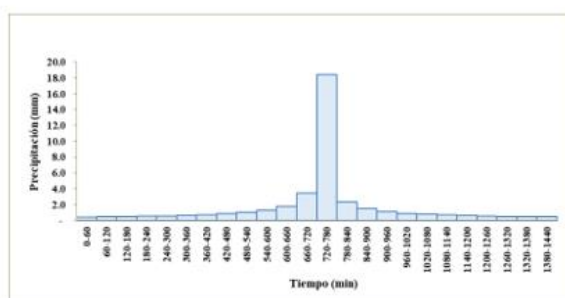
Hietograma de precipitación TR = 2 años - Estación Huasahuasi



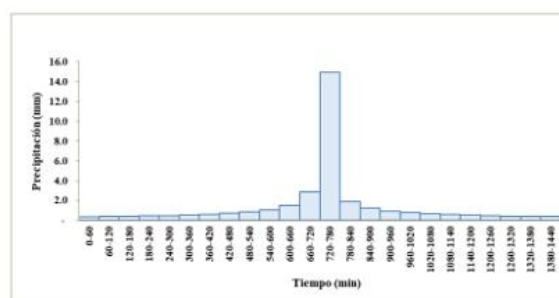
Hietograma de precipitación TR = 100 años - Estación Huasahuasi



Hietograma de precipitación TR = 5 años - Estación Huasahuasi

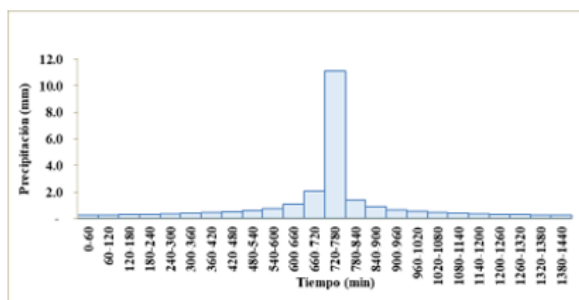


Hietograma de precipitación TR = 200 años - Estación Huasahuasi

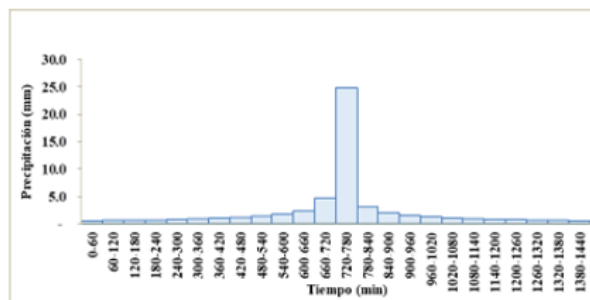


Hietograma de precipitación TR = 25 años - Estación Huasahuasi

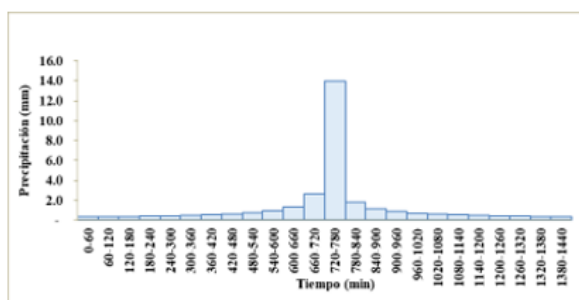
Figura 12: Hietogramas para diferentes TR – Estación Comas



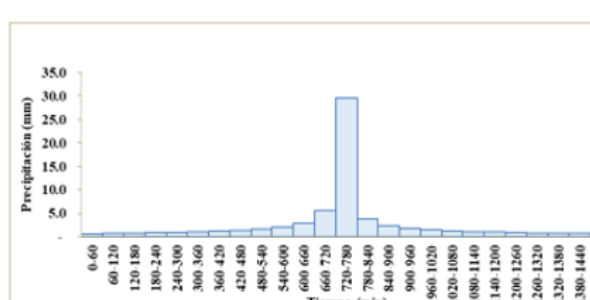
Hietograma de precipitación TR = 2 años - Estación Comas



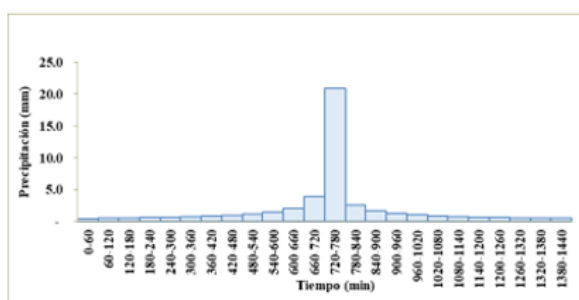
Hietograma de precipitación TR = 50 años - Estación Comas



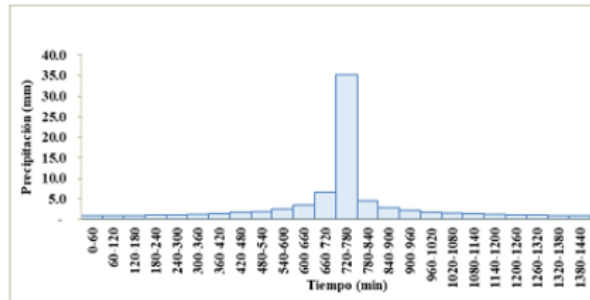
Hietograma de precipitación TR = 5 años - Estación Comas



Hietograma de precipitación TR = 100 años - Estación Comas

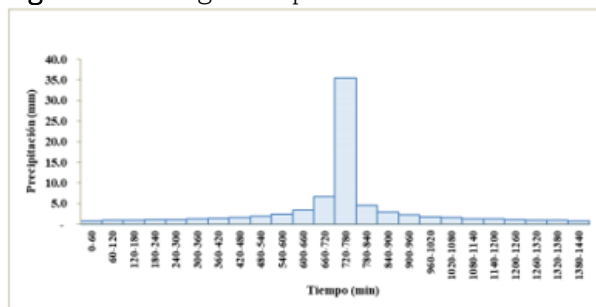


Hietograma de precipitación TR = 25 años - Estación Comas

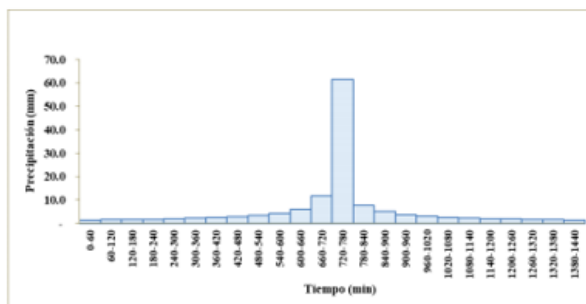


Hietograma de precipitación TR = 200 años - Estación Comas

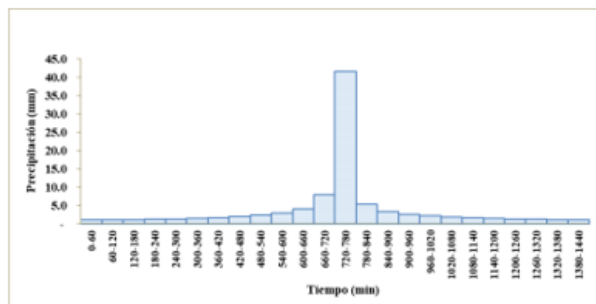
Figura 13: Hietogramas para diferentes TR – Estación San Eloy de Singayac



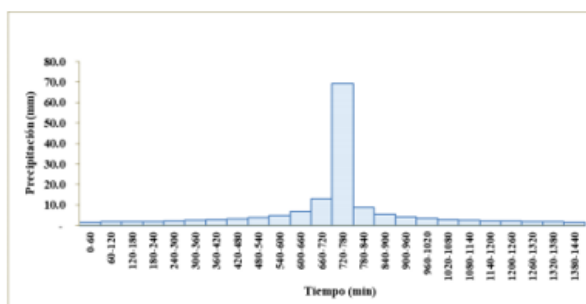
Hietograma de precipitación TR = 2 años - Estación San Eloy de Singayac



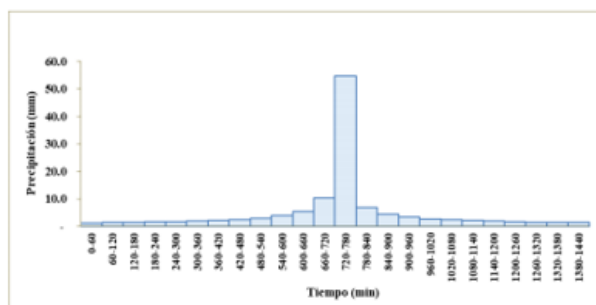
Hietograma de precipitación TR = 50 años - Estación San Eloy de Singayac



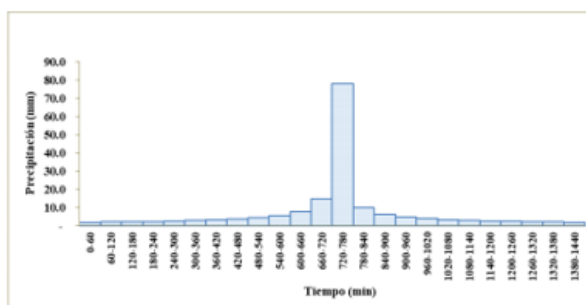
Hietograma de precipitación TR = 5 años - Estación San Eloy de Singayac



Hietograma de precipitación TR = 100 años - Estación San Eloy de Singayac

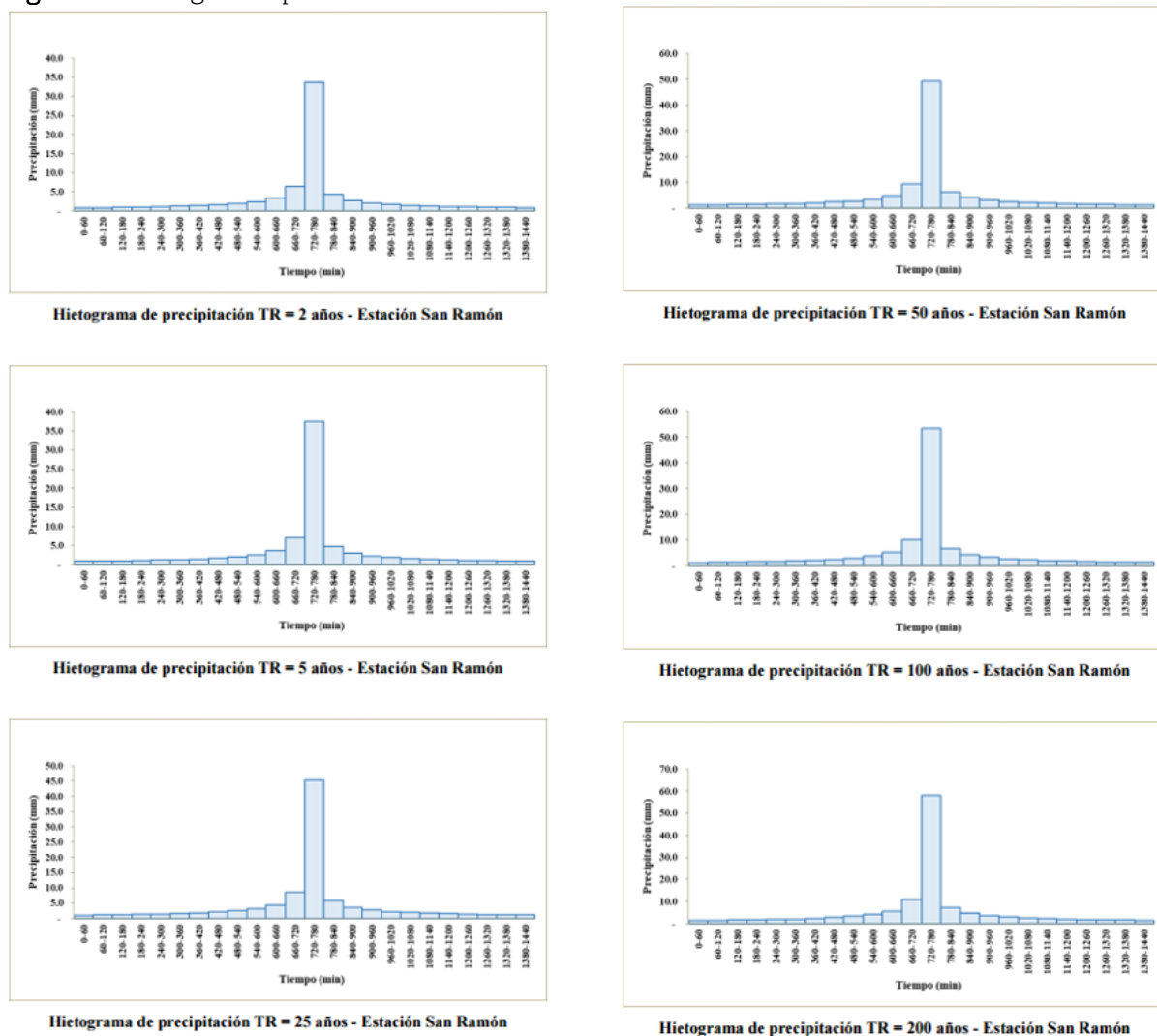


Hietograma de precipitación TR = 25 años - Estación San Eloy de Singayac



Hietograma de precipitación TR = 200 años - Estación San Eloy de Singayac

Figura 14: Hietogramas para diferentes TR – San Ramon



La asignación espacial de la precipitación a cada una de las 12 subcuencas del modelo se realizó mediante el método de Polígonos de Thiessen, implementado en HEC-HMS a través de la opción "Gage Weights". (Ver Tabla 10)

Tabla 10: Influencia de las estaciones pluviométricas sobre cada subcuenca (%)

Nombre	Tarma	Ricrán	Huasahuasi	Comas	Áreas de Influencia (%)	
					San Eloy de Singayac	San Ramón
SC-01	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-02	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-03	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-04	0.0	0.0	98.0	0.0	0.0	2.0



SC-05	0.0	0.0	34.0	0.0	0.0	66.0
SC-06	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-07	0.0	0.0	79.0	0.0	21.0	0.0
SC-08	0.0	0.0	33.0	0.0	35.0	33.0
SC-09	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-10	0.0	0.0	72.0	0.0	28.0	0.0
SC-11	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
SC-12	0.0	0.0	52.0	0.0	48.0	0.0

Calibración del Modelo

La calibración es un paso indispensable para asegurar la representatividad del modelo hidrológico. La cuenca Yanango es no aforada, lo que significa que carece de series temporales de caudales observados (aforos) para una calibración hidrológica convencional. (Feldman, 2000)

Ante esta limitación, se adoptó una metodología de calibración estándar para cuencas no aforadas: la optimización del modelo contra un caudal de referencia de alta fiabilidad. Se empleó como valor objetivo el caudal máximo para un período de retorno (TR) de 200 años 202.82 m³/s, derivado del "Estudio Definitivo para la construcción del túnel Yanango y accesos" (MTC, 2013).

La selección de este valor objetivo se fundamenta en dos criterios:

1. **Pertinencia Técnica:** El estudio del MTC (2013) es el documento de ingeniería oficial para el diseño de infraestructura en la zona, representando la estimación hidrológica extrema más robusta disponible.
2. **Sensibilidad del Parámetro:** El proceso se centró en la optimización del Número de Curva (CN), dado que este es el parámetro de mayor influencia y sensibilidad sobre el volumen de escorrentía directa y, consecuentemente, sobre el caudal pico.

La calibración se ejecutó como un proceso iterativo utilizando las herramientas de optimización de HEC-HMS. Se ajustaron sistemáticamente los valores de CN de las 12 subcuencas (partiendo de los valores iniciales de la Tabla 6) hasta que el caudal pico simulado convergió con el caudal objetivo, minimizando el error porcentual.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se exponen los hallazgos del modelamiento hidrológico. La presentación sigue un orden lógico: primero, se demuestran los resultados de la calibración del modelo (que validan su rigor metodológico); segundo, se presentan los caudales líquidos y sólidos simulados; y tercero, se discuten las implicaciones de estos hallazgos, contrastándolos con la teoría y su aplicación práctica.

Resultados de la Calibración del Modelo

Este valor representó una sobreestimación del 15.22% (Tabla 11), indicando que los CN iniciales no reflejaban adecuadamente la respuesta real de la cuenca y requerían optimización.

Tabla 11: Resultados de la Simulación Inicial vs. Calibrada (TR=200 años)

Simulación	Caudal Pico Simulado (m ³ /s)	Valor Objetivo (MTC, 2013) (m ³ /s)	Error Relativo (%)
Corrida Inicial (CN sin ajustar)	233.67	202.82	15.22
Corrida Final (CN Calibrado)	202.35	202.82	0.22

Para lograr el ajuste, se optimizaron los CN en las 12 subcuencas (Tabla 12). Este ajuste modificó los valores de CN, lo que implica que el modelo calibrado asigna una menor capacidad de infiltración y una mayor generación de escorrentía que la estimada por los mapas base, reflejando mejor las condiciones de Yanango.

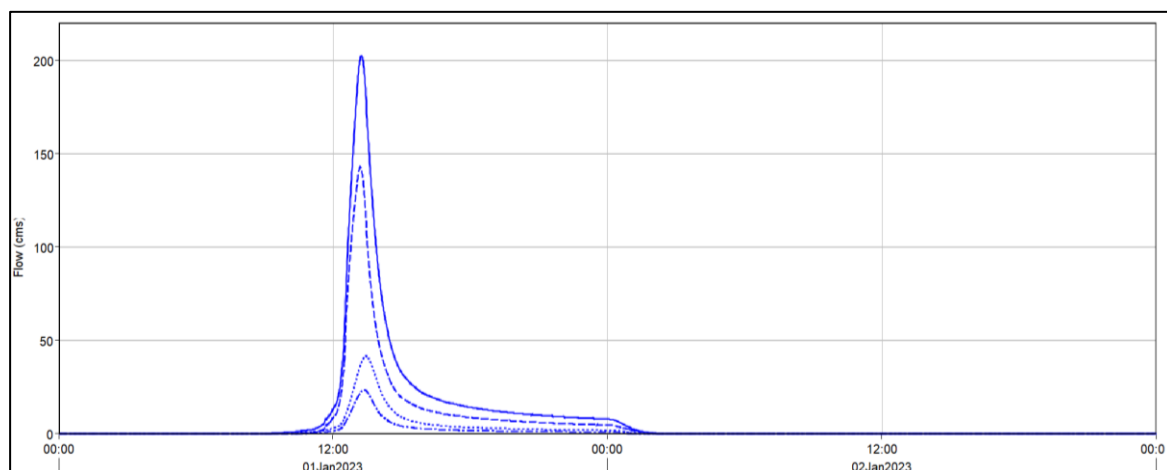
Tabla 12: Valores de Curva Número (CN) Iniciales vs. Calibrados

Nombre	CN inicial	CN calibración
SC-01	81	89.1
SC-02	81	84.5
SC-03	78.71	78.56
SC-04	77.06	67.64
SC-05	76.43	48.14
SC-06	74.02	88.07
SC-07	80.19	87.82
SC-08	75.03	71.83
SC-09	89.41	77.12
SC-10	87.82	70.9
SC-11	89.13	62.52
SC-12	82.9	60.29



El resultado final calibrado de 202.35 m³/s, con un error despreciable (+0.22 %), demuestra que el modelo HEC-HMS, con los parámetros ajustados, es una representación hidrológica válida de la cuenca Yanango para eventos extremos. (Ver Figura 12)

Figura 15: Caudal máximo para 200 años de periodo de retorno



Fuente: HEC-HMS

Caudales Líquidos y Producción de Sedimentos

Con el modelo validado, se ejecutaron las simulaciones para el rango completo de periodos de retorno. Se presenta los hallazgos objetivos clave del estudio, mostrando los caudales máximos (flujo líquido, Ver Tabla 13) y la producción total de sedimentos (flujo sólido, Ver Tabla 14) en el punto de salida de la cuenca (Tramo G).

Tabla 13: Caudales Máximos (m³/s)

Nombre	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 25 años	TR= 50 años	TR= 100 años	TR= 200 años
SC-01	7.75	8.61	10.27	11.06	11.89	12.77
SC-02	8.82	9.94	12.12	13.15	14.24	15.4
SC-03	28.21	32.39	40.7	44.69	48.94	53.47
SC-04	13.66	16.17	21.33	23.89	26.67	29.67
SC-05	9.33	11.38	15.83	18.11	20.66	23.48
SC-06	23.07	26.26	32.39	35.26	38.27	41.44
SC-07	34.37	39.05	48.14	52.45	56.99	61.79
SC-08	28.13	33.88	45.77	51.65	58.04	64.94
SC-09	9.11	10.33	12.78	13.96	15.22	16.57
SC-10	13.65	15.75	20.02	22.12	24.38	26.83
SC-11	26.14	30.54	39.72	44.32	49.35	54.85
SC-12	14.19	16.78	22.22	24.97	27.97	31.26

Tabla 14: Producción de sedimentos (tn/ha/año)

Nombre	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 25 años	TR= 50 años	TR= 100 años	TR= 200 años
SC-01	1.47	1.67	2.09	2.29	2.5	2.73
SC-02	3.67	4.24	5.39	5.95	6.55	7.2
SC-03	9.63	11.34	14.86	16.61	18.5	20.56
SC-04	2.23	2.7	3.7	4.21	4.78	5.4
SC-05	2.89	3.6	5.19	6.02	6.97	8.05
SC-06	2.21	2.59	3.34	3.71	4.1	4.52
SC-07	2.84	3.29	4.2	4.64	5.11	5.62
SC-08	1.17	1.43	1.99	2.27	2.59	2.94
SC-09	4.42	5.12	6.57	7.28	8.07	8.91
SC-10	3.3	3.88	5.1	5.71	6.38	7.12
SC-11	2.73	3.24	4.35	4.91	5.54	6.24
SC-12	2.27	2.74	3.75	4.27	4.84	5.49
Tramo-A	46.32	46.82	47.89	48.43	49.04	49.72
Tramo-B	57.73	68.41	83.08	83.65	84.28	84.98
Tramo-C	63.44	75.06	99	112.28	124.32	135.54
Tramo-D	113.68	134.01	150.97	160.36	168.89	176.86
Tramo-E	116.59	137.38	150.15	157.21	163.63	169.65
Tramo-F	131.35	155.02	173.89	184.05	193.89	203.67
Tramo-G	136.49	160.93	181.37	192.28	202.94	213.6

La distribución espacial de la producción de sedimentos para el evento de diseño (TR=200 años) no es homogénea. El análisis espacial revela que la producción de sedimentos se concentra críticamente en los tramos aguas abajo. (Ver Figura 13 y Figura 14)



Figura 16: Distribución espacial de Producción de Sedimentación

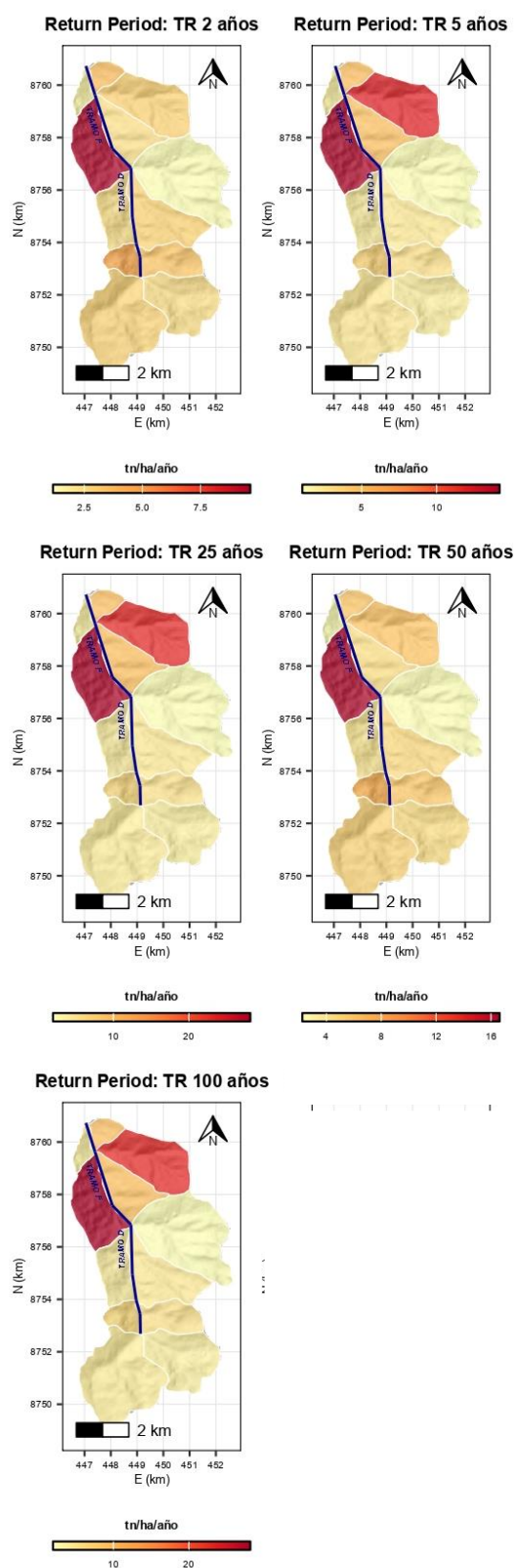
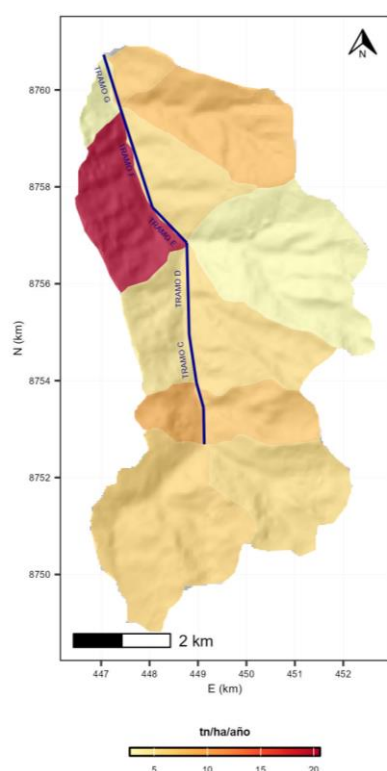


Figura 17: Distribución espacial de Producción de Sedimentación – TR 200



DISCUSIÓN

La producción de sedimentos obtenida para un periodo TR de 2 años refleja el comportamiento promedio y la dinámica de transporte recurrente de la cuenca Yanango. Al contrastar estos resultados con el “Atlas de producción de sedimentos del Perú: una evaluación histórica y futura con énfasis en las cuencas de aporte de las EPS” (Sabino Rojas et al., 2021), se observa una alta correspondencia con la caracterización regional de la cuenca del Río Perené, sistema receptor de los caudales de la zona de estudio.

El Atlas identifica a esta región con las mayores tasas de transporte de sólidos de la vertiente oriental debido a su dinámica hidráulica. Los resultados de este estudio ratifican esa tendencia: el modelo HEC-HMS detecta una movilidad sustancial de sedimentos en los tramos bajos, incluso para un TR de 2 años. Esta coincidencia indica que la colmatación en sectores como el puente Yanango es un fenómeno acumulativo recurrente, consistente con el 'transporte permanente' reportado por dicha investigación en la selva central.



Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-11 y SC-12 producen 2.73 y 2.27 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 6.24 y 5.49 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 26.1 y 14.2 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 54.85 y 31.26 m³/s de caudal máximo.

Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-09 y SC-10 producen 4.42 y 3.30 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 8.91 y 7.12 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 9.11 y 13.65 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 15.57 y 26.83 m³/s de caudal máximo.

Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-07 y SC-08 producen 2.84 y 1.17 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 5.62 y 2.94 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 34.37 y 28.13 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 61.79 y 64.94 m³/s de caudal máximo.

Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-05 y SC-06 producen 2.89 y 2.21 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 8.05 y 4.52 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 9.33 y 23.07 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 23.48 y 41.44 m³/s de caudal máximo.

Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-04 y SC-03 producen 9.63 y 2.23 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 20.56 y 5.40 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 28.21 y 13.66 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 53.47 y 29.67 m³/s de caudal máximo.

Las subcuencas aguas arriba correspondientes a SC-01 y SC-02 producen 1.47 y 3.67 tn/ha/año de sedimentos para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años producen 2.73 y 7.20 tn/ha/año de sedimentos. El caudal máximo que presentan es de 7.75 y 8.82 m³/s respectivamente para un TR de 2 años, para un TR de 200 años producen 12.77 y 15.40 m³/s de caudal máximo.

- En el Tramo A se obtuvo una producción de sedimentos de 46.32 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 49.72 tn/ha/año de sedimentos.



- En el Tramo B se obtuvo una producción de sedimentos de 57.73 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 84.98 tn/ha/año de sedimentos.
- En el Tramo C se obtuvo una producción de sedimentos de 63.44 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 135.54 tn/ha/año de sedimentos.
- En el Tramo D se obtuvo una producción de sedimentos de 113.68 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 176.86 tn/ha/año de sedimentos.
- En el Tramo F se obtuvo una producción de sedimentos de 131.35 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 203.67 tn/ha/año de sedimentos.
- En el Tramo G se obtuvo una producción de sedimentos de 136.49 tn/ha/año para un TR de 2 años, mientras que para un TR de 200 años produce 213.60 tn/ha/año de sedimentos.

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos para un TR de 2 años guardan consistencia con los rangos establecidos para la unidad hidrográfica analizada en el “Atlas de producción de sedimentos del Perú: una evaluación histórica y futura con énfasis en las cuencas de aporte de las EPS” (Sabino Rojas et al., 2021). La capacidad del modelo para replicar la dinámica mediante el método de Toffaleti valida la simulación, evidenciando que la producción de sedimentos en Yanango es una condición intrínseca y recurrente del sistema.

Las subcuencas estudiadas muestran una notable variabilidad en la producción de sedimentos y los caudales máximos en función del tiempo de retorno (TR). Para un TR de 2 años, la producción de sedimentos varía entre 1.17 y 9.63 tn/ha/año, mientras que, para un TR de 200 años, esta variabilidad se extiende de 2.73 a 20.56 tn/ha/año. Los caudales máximos también presentan diferencias significativas, con valores que oscilan entre 7.75 y 34.37 m³/s para un TR de 2 años, y entre 12.77 y 64.94 m³/s para un TR de 200 años.

La evaluación con un TR de 200 años ha permitido entender la dinámica de la cuenca durante eventos extremos. Las subcuencas presentan un aumento significativo en la producción de sedimentos y los caudales máximos, lo que indica que eventos menos frecuentes, pero más severos tienen un impacto



sustancial en la erosión y sedimentación. Por ejemplo, los tramos D, F y G presentan las mayores producciones de sedimentos para un TR de 200 años, alcanzando 176.86, 203.67 y 213.60 tn/ha/año respectivamente.

Los tramos aguas abajo (A, B, C, D, F y G) presentan una tendencia creciente en la producción de sedimentos con el aumento del tiempo de retorno. En particular, los tramos D, F y G exhiben los valores más altos de producción de sedimentos para un TR de 200 años, lo que sugiere un mayor riesgo de erosión y sedimentación en estas áreas durante eventos extremos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2015). Generación del Mapa Temático de Curva Número (CN).

Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH). Lima, Perú.

Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method).

Journal of Hydraulic Research, 7(2), 205-230. <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>

Feldman, A. D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. Davis,

CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones). (2013). Estudio Definitivo para la construcción

del túnel Yanango y accesos. Informe Técnico. Lima: Proyecto Especial de Infraestructura de

Transporte Nacional - PROVIAS.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion

by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation

(RUSLE). USDA Agricultural Handbook No. 703.

Sabino Rojas, E., Lavado-Casimiro, W., & Asencios Astorayme, H. J. (2021). Atlas de producción de

sedimentos del Perú: una evaluación histórica y futura con énfasis en las cuencas de aporte de

las EPS.

Scharffenberg, W. (2023). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Version 4.11. Davis,

CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Manual Online

Toffaleti, J. P. (1968). A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed

distribution, bed to surface. Technical Report No. 5. US Army Corps of Engineers.



- USDA-NRCS. (2004). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 10. Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2023). HEC-HMS Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources.
- Villón, M. (2011). Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas. Lima, Perú: Ediciones Villón.

