

Spatial estimation of the runoff coefficient in the Rímac river basin using slopes, NDVI and soil permeability using GEE

Vera Ortega Danna Jamila¹, Perez Laura Noemí Geraldine Laura², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00310119@upn.pe, N00243166@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Abstract– *The Rímac River basin, the main source of water supply for Lima Metropolitan Area, exhibits a complex hydrological response influenced by climatic variability, topography, and soil properties, which complicates the accurate estimation of surface runoff using traditional approaches. In this context, the runoff coefficient (C) represents a key parameter for hydraulic design and hydrological risk assessment. This study aims to estimate the spatial and temporal distribution of the runoff coefficient in the Rímac River basin through the integration of slope, vegetation cover (NDVI), and soil permeability using the Google Earth Engine platform. For this purpose, satellite data from SRTM, MODIS, OpenLandMap, and SoilGrids were processed to generate monthly runoff coefficient maps with homogeneous spatial resolution. The results reveal a marked spatial and seasonal variability of the runoff coefficient, with higher values concentrated in the upper and middle sections of the basin and during wet and transitional periods, highlighting the usefulness of the proposed approach to support preliminary hydrological risk assessment and hydraulic design in basins with limited hydrometric information.*

Keywords– *Rímac Basin, Google Earth Engine, NDVI, Runoff, Rational Method*

Estimación espacial del coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Rímac mediante pendientes, NDVI y permeabilidad del suelo usando GEE

Vera Ortega Danna Jamila¹, Perez Laura Noemí Geraldine Laura², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00310119@upn.pe, N00243166@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Resumen— La cuenca del río Rímac, principal fuente de abastecimiento de agua para Lima Metropolitana, presenta una respuesta hidrológica compleja influenciada por la variabilidad climática, la topografía y las propiedades del suelo, lo que dificulta la estimación adecuada de la escorrentía superficial mediante métodos tradicionales. En este contexto, el coeficiente de escorrentía (C) constituye un parámetro clave para el diseño hidráulico y la evaluación del riesgo hidrológico. El presente estudio tiene como objetivo estimar de manera espacial y temporal el coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Rímac mediante la integración de pendiente, cobertura vegetal (NDVI) y permeabilidad del suelo, utilizando la plataforma Google Earth Engine. Para ello, se emplearon datos satelitales SRTM, MODIS, OpenLandMap y SoilGrids, los cuales fueron procesados para generar mapas mensuales del coeficiente C con resolución homogénea. Los resultados evidencian una marcada variabilidad espacial y estacional del coeficiente de escorrentía, con valores más elevados en las zonas altas y medias de la cuenca y durante los meses húmedos y de transición, lo que resalta la utilidad del enfoque propuesto para apoyar la evaluación preliminar del riesgo hidrológico y el diseño hidráulico en cuencas con limitada información hidrométrica.

Palabras clave— Cuenca del Rímac, Google Earth Engine, NDVI, Escorrentía, Método Racional.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, las cuencas hidrográficas que abastecen a zonas urbanas y rurales enfrentan desafíos crecientes debido a la variabilidad climática, la expansión urbana y la escasez de datos hidrométricos continuos para la correcta estimación de procesos hidrológicos como la escorrentía superficial. En particular, la cuenca del río Rímac, principal proveedor de agua para Lima Metropolitana, ha mostrado variaciones significativas en sus niveles de caudal durante los últimos años, con reportes oficiales que destacan incrementos de hasta un 35 % en el caudal del río durante octubre de 2024 frente a años anteriores, asociado a eventos de lluvias torrenciales en la zona altoandina [1].

Estas condiciones hidrológicas han generado escenarios de riesgo para las poblaciones asentadas en las riberas del cauce, donde se han reportado viviendas en peligro por crecidas repentinas del río Rímac, afectando distritos como Chosica y Chaclacayo [2], así como alertas emitidas por entidades y medios de comunicación sobre familias expuestas a posibles desbordes [3].

Asimismo, recientemente se informó que el río Rímac incrementó su caudal en el contexto de una alerta naranja por lluvias en la sierra central, calificándose la situación como peligrosa para la población y la infraestructura cercana al cauce, lo que evidencia la recurrencia y actualidad del problema hidrológico en la cuenca, como se muestra en la figura 1 [4]. Estos eventos confirman que la respuesta hidrológica del Rímac está fuertemente condicionada por factores fisiográficos y antrópicos, los cuales influyen directamente en la generación de escorrentía superficial.



Fig. 1 Aumento de caudal del Río Rímac. Recuperado de Infobae, 2026. [4]

La literatura científica ha señalado que la escorrentía superficial está influenciada por factores físicos y ambientales como la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y la permeabilidad del suelo, los cuales determinan la rapidez con que el agua de lluvia escurre hacia los cauces y, por ende, condicionan los volúmenes de escorrentía generados en una cuenca [5][6].

En este contexto, el coeficiente de escorrentía (C), empleado en métodos hidrológicos como el método racional, representa un parámetro clave para el diseño de obras hidráulicas menores y la evaluación de riesgos por inundación; sin embargo, su estimación suele verse limitada por la falta de información espacial actualizada sobre el uso del suelo y las condiciones físicas de la cuenca [7].

Frente a estas limitaciones, el uso de herramientas de teledetección y plataformas de análisis geoespacial como Google Earth Engine (GEE) [8] permite acceder a información satelital reciente y de alta resolución, facilitando la estimación

espacial de variables como la pendiente, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la permeabilidad del suelo. El NDVI, derivado de imágenes satelitales, es ampliamente empleado para representar la cobertura vegetal y su influencia en la escorrentía superficial [9].

II. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

La presente investigación es relevante debido a que permite mejorar la estimación del coeficiente de escorrentía (C) mediante un enfoque actualizado y detallado, basado en la integración de pendientes, cobertura vegetal y propiedades del suelo obtenidas de datos satelitales. La incorporación de la variabilidad estacional del NDVI y la comparación entre SoilGrids y OpenLandMap mejoran la aplicación del método racional, favoreciendo un diseño más confiable de obras hidráulicas y una mejor gestión del riesgo hidrológico en la cuenca del río Rímac.

III. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Proponer una metodología para la estimación espacial del coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Rímac, basada en pendientes, NDVI y permeabilidad del suelo mediante Google Earth Engine, orientada a la gestión del riesgo y el diseño hidráulico en Lima Metropolitana.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Ubicación del proyecto

La cuenca del río Rímac se localiza en la vertiente del Pacífico del Perú, abarcando principalmente el departamento de Lima. Se sitúa en la zona UTM 18S y limita con las cuencas de los ríos Chillón, Lurín y Mantaro, extendiéndose desde las zonas altoandinas de Huarochirí hasta su desembocadura en el océano Pacífico.

4.2 Factores geomorfológicos de la cuenca

La cuenca del río Rímac presenta una extensión de 3503.95 km² y su cauce principal alcanza una longitud de 127.02 km. Su nacimiento se localiza en la Cordillera Central de los Andes, formándose a partir de la confluencia de los ríos Santa Eulalia y San Mateo a la altura de Chosica, para luego desembocar en el océano Pacífico [10].

La parte alta de la cuenca, que constituye aproximadamente el 65.7% del área total 2303.1 km², se considera la zona húmeda y es donde se origina el escurrimiento natural, principalmente por precipitaciones estacionales. Esta región altoandina presenta una topografía compleja que, junto con la cobertura vegetal, influye significativamente en el régimen hidrológico. El relieve favorece una rápida escorrentía hacia el cauce principal, mientras que la presencia de nevados contribuye al caudal durante la época de estiaje, mitigando parcialmente la severa reducción característica de este periodo [11].

La distribución espacial de esta compleja topografía y su gradiente altitudinal se puede apreciar en el mapa de la cuenca

presentado en la figura 2.

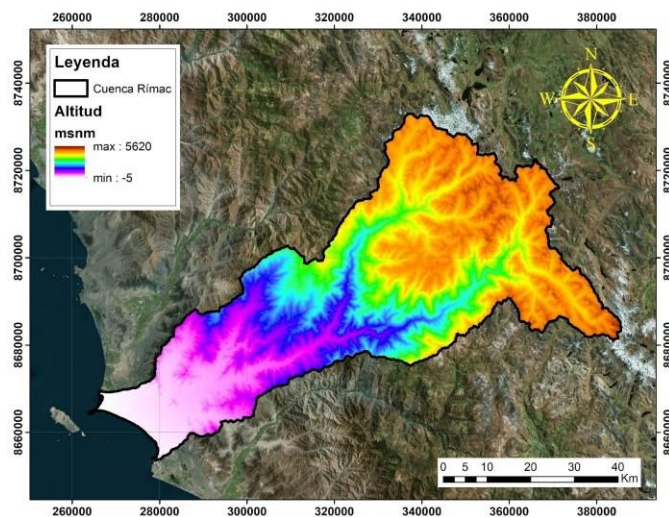


Fig 2. Representación gráfica de altitudes de la cuenca Rímac.

4.3 Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma de análisis geoespacial que combina un amplio catálogo de datos listos para su uso con un sistema de computación de alto rendimiento basado en procesamiento paralelo. La plataforma es accesible mediante una API y un entorno de desarrollo web, lo que permite analizar grandes volúmenes de información geoespacial, incluyendo datos satelitales, variables ambientales, climáticas y de cobertura del suelo, previamente preprocesados para facilitar su manejo y visualización eficiente [12].

4.4 ArcGIS

ArcGIS es un sistema de análisis espacial que procesa, analiza y visualiza datos geográficos según su ubicación y características. Funciona mediante bases de datos geoespaciales que permiten operaciones geométricas, estadísticas y algebraicas, facilitando la identificación de patrones y relaciones en el territorio. A través de herramientas como superposición, buffers y modelos de proximidad, evalúa distancias, áreas y conexiones espaciales, contribuyendo a la toma de decisiones basada en información espacial. [13].

4.5 El espectro electromagnético

El espectro electromagnético corresponde al conjunto total de longitudes de onda de la radiación electromagnética. Dentro de este espectro se distinguen diversas regiones de interés para la teledetección, entre las que destacan la luz visible, el infrarrojo reflejado, el infrarrojo térmico y las microondas. La radiación electromagnética es emitida de forma natural por todos los cuerpos, manifestándose en distintas longitudes de onda según sus características físicas [14].

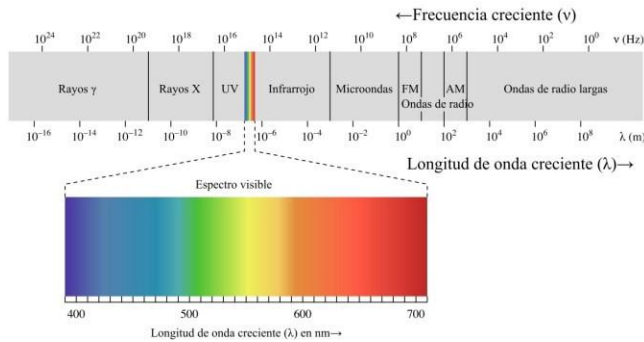


Fig 3. Diagrama del espectro electromagnético [14].

La Figura 3 ilustra este concepto mediante la representación de las principales subdivisiones del espectro electromagnético, indicando sus rangos de longitudes de onda, las frecuencias asociadas y ejemplos representativos de su aplicación en sensores remotos.

4.6 NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)

El NDVI es un indicador obtenido a partir de imágenes satelitales que permite estimar la presencia y condición de la vegetación mediante la comparación de la reflectancia registrada en el infrarrojo cercano (NIR) y en la banda roja (RED).

TABLA 1

Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI

Clase	Valores de NDVI	Cobertura de la Tierra	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Incluye cuerpos de agua como ríos, quebradas y lagunas, así como nubes.
2	$-0.1 - 0.15$	Tierra desnuda	Corresponde a áreas sin vegetación, como suelos degradados, zonas urbanas (asentamientos, vías) y superficies expuestas.
3	$0.15 - 0.25$	Vegetación dispersa	Áreas con cubierta vegetal mínima, como tierras de cultivo recién aradas, pastizales secos, herbazales y arbustos aislados.
4	$0.25 - 0.40$	Vegetación abierta	Zonas con vegetación leñosa o arbustiva, como bosques secos y plantaciones jóvenes.
5	> 0.40	Vegetación cerrada	Áreas de alta densidad vegetal, como bosques húmedos, cultivos maduros y vegetación en pleno crecimiento.

Fuente: Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI), 2019 [15].

Se calcula a partir de la relación entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED), mediante la expresión

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \dots (1).$$

Este índice genera una escala lineal de valores comprendida entre -1 y 1 , donde el valor cercano a cero representa el inicio de la ausencia de vegetación, mientras que los valores negativos corresponden a superficies sin cobertura vegetal. La normalización del NDVI permite reducir los efectos topográficos, la degradación de calibración del sensor y la influencia atmosférica, lo que, junto con su sencillez matemática, lo convierte en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de vegetación [15]. Esta información se puede visualizar en la tabla 1.

4.7 USGS/SRTMGL1_003

El Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es una misión de la NASA que generó un Modelo Digital de Elevación (MDE) casi global mediante interferometría radar. Distribuidos por el USGS, sus datos ofrecen una resolución aproximada de 30 m, utilizada ampliamente en estudios hidrológicos. Este MDE representa la altitud del terreno, permitiendo derivar variables como la pendiente, la cual influye directamente en la velocidad del flujo superficial y resulta fundamental para caracterizar la topografía de la cuenca del río Rímac e integrar el efecto del relieve en la estimación espacial del coeficiente de escorrentía [16].

4.8 OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System)

El conjunto de datos OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System) ofrece una clasificación textural del suelo, según el sistema del USDA, para seis profundidades (0-200 cm) con una resolución de 250 m. Al diferenciar la composición de arcilla, limo y arena, integra información que influye en propiedades hidrológicas clave, como la infiltración y retención de agua. Esto resulta fundamental para caracterizar la permeabilidad del suelo en la cuenca del río Rímac e incorporar su efecto en la estimación espacial del coeficiente de escorrentía [17].

4.9 Soil Grids 250m v2.0

SoilGrids 250m v2.0, desarrollado por ISRIC, es un conjunto de mapas globales de propiedades del suelo generados mediante mapeo digital. Combina observaciones de perfiles con variables ambientales para proporcionar, a una resolución de 250 m y varias profundidades, datos sobre propiedades físicas y químicas como la textura y la densidad aparente. Esta información resulta fundamental para estudios hidrológicos, ya que caracteriza aspectos del suelo que influyen directamente en la infiltración y la escorrentía superficial, permitiendo su integración en análisis espaciales de cuencas como la del río Rímac [18].

4.10 MODIS/006/MOD13Q1

El producto MODIS/006/MOD13Q1 de la misión MODIS proporciona índices de vegetación como el NDVI y EVI, con una resolución de 250 m y una frecuencia de 16 días. Estos datos permiten evaluar la dinámica espaciotemporal de la

cobertura vegetal, analizando su salud y densidad en grandes áreas. Dado que la vegetación influye directamente en procesos hidrológicos como la infiltración y la escorrentía, estos productos son ampliamente utilizados en estudios de cuencas para estimar parámetros del comportamiento hidrológico e integrar indicadores ambientales en plataformas de análisis geoespacial [19].

4.11 Clasificación del C según manual de hidráulica de MTC 2014

El Manual de Hidráulica del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú, en su edición 2014, constituye un documento de referencia que sintetiza los lineamientos técnicos para el diseño de obras de drenaje superficial y subterráneo en infraestructura vial, estableciendo criterios y procedimientos aplicables. [20] En la tabla 2 se presenta la clasificación del coeficiente de escorrentía C correspondiente al método racional, según lo indicado en dicho manual.

TABLA 2
COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO (C) -mensuales MTC PERÚ

Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente				
		Pron. (>50%)	Alta (>20%)	Media (>5%)	Suave (>1%)	Desp. (<1%)
Sin vegetación	I	0.8	0.75	0.70	0.65	0.60
	SP	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	P	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	I	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	SP	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	P	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	I	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	SP	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	P	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	I	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	SP	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	P	0.30	0.25	0.20	0.15	0.15
Bosques, densa vegetación	I	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	SP	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	P	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC)

* P: Permeable, SP: Semipermeable e I: Impermeable.

V. METODOLOGÍA

Para la presente investigación se desarrolló un script en lenguaje JavaScript dentro de la plataforma Google Earth Engine (GEE), orientado a integrar variables geoespaciales que controlan la generación de escorrentía superficial, tales como la pendiente del terreno, la permeabilidad del suelo y la cobertura vegetal estimada mediante el NDVI. A partir de esta integración se realiza la estimación espacial del coeficiente de escorrentía (C) en la cuenca del río Rímac, obteniendo mapas mensuales con resolución homogénea que permiten caracterizar su comportamiento hidrológico de forma continua.

5.1 Periodo de estudio

Se definió un marco temporal comprendido entre el 1 de enero de 2000 y el 31 de diciembre de 2025, lo que permite analizar más de dos décadas de variabilidad climática y cambios en la

cobertura del suelo que influyen directamente en los procesos de escorrentía dentro de la cuenca del río Rímac.

5.2 Delimitación espacial

La cuenca hidrográfica del río Rímac fue incorporada en GEE mediante una fuente geoespacial externa (formato Shapefile), el cual se emplea con máscara espacial para recortar todas las capas de análisis, garantizando coherencia geográfica en cada uno de los procesos de cálculos.

5.3 Análisis Topográfico

Se utilizó el Modelo Digital de Elevación SRTM (USGS/SRTMGL1_003) con resolución de 30 m para derivar el mapa de pendientes. Posteriormente, la pendiente fue reclasificada en rangos representativos y normalizada, considerando su influencia directa en la velocidad del escurrimiento superficial y en el incremento del coeficiente C.

5.4 Caracterización del suelo y permeabilidad

Se incorporaron los conjuntos de datos OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System) y SoilGrids 250 m v2.0, los cuales proporcionan información sobre la textura y composición del suelo. Con esta información, los suelos fueron clasificados según su comportamiento hidrológico en permeables, semipermeables e impermeables, asociados a diferentes capacidades de infiltración.

5.5 Análisis de cobertura vegetal (NVDI)

Para la evaluación de la vegetación se empleó el producto MODIS/006/MOD13Q1, con resolución de 250 m y periodicidad de 16 días. A partir de este producto se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que fue reclasificado en categorías como sin vegetación, cultivos, pastos o vegetación ligera, herbáceas y vegetación densa, considerando su efecto protector del suelo frente a la escorrentía.

5.6 Integración y modelamiento del coeficiente C

Las capas de pendiente, permeabilidad del suelo y NDVI fueron integradas en un modelo espacial dentro de GEE. A cada combinación se le asignaron valores de coeficiente de escorrentía (C) conforme a los criterios del Manual de Hidrología e Hidráulica del MTC (2014), generándose mapas mensuales que representan la variabilidad espacial del parámetro en la cuenca del río Rímac.

5.7 Homogeneización espacial

Todas las variables fueron proyectadas y muestreadas a una resolución común de 100 m por píxel, utilizando el sistema de coordenadas correspondiente al área de estudio, con el fin de asegurar compatibilidad espacial entre capas y mejorar la precisión del cálculo por píxel.

5.8 Representación cartográfica

Los resultados fueron visualizados mediante mapas temáticos mensuales del coeficiente C, aplicando una escala cromática gradual que facilita la interpretación del comportamiento hidrológico, identificando zonas de baja, media y alta escorrentía dentro de la cuenca.

5.9 Configuración del entorno de visualización

El script ajusta automáticamente el encuadre del mapa en GEE, centrando la visualización sobre la cuenca del río Rímac con un nivel de zoom adecuado que permite la inspección espacial directa de los resultados

5.10 Exportación de resultados

Finalmente, los mapas mensuales del coeficiente de escorrentía, junto con los productos intermedios (pendiente, NDVI y permeabilidad), fueron exportados en formato GeoTIFF con resolución de 100 m, almacenándose en Google Drive con una nomenclatura secuencial que facilita su organización y posterior análisis en SIG.

VI. RESULTADOS

Se realizó una clasificación del NDVI que refleja el nivel de cobertura vegetal en la cuenca, expresando sus valores medios para diferentes periodos. Este índice es determinante en el cálculo del coeficiente de escorrentía: las zonas con alta cobertura vegetal presentan mayor retención de agua y valores bajos de C, mientras que las áreas con escasa vegetación incrementan la escorrentía superficial. Por tanto, el NDVI permite representar la influencia de la vegetación en la regulación hidrológica, siendo una variable esencial para la estimación espacial del coeficiente de escurrimiento. Esta clasificación se visualiza en la tabla 3.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN DE NDVI SEGÚN COBERTURA VEGETAL Y PERMEABILIDAD

Rango NDVI	Clase	Cobertura Vegetal
< 0.20	0	Suelo Desnudo
0.20-0.30	1	Escasa vegetación
0.30-0.40	2	Vegetación Media
0.40-0.60	3	Densa / Pasto alto
> 0.60	4	Bosque denso

Fuente: Adaptado de valores de referencia FAO, MTC (Perú) y estudios hidrológicos MODIS NDVI por el ingeniero Abel Carmona Arteaga.

TABLA 4
TABLA DE CLASIFICACIÓN DE TEXTURA DEL SUELO (OpenLandMap / USDA)

Clase de textura	Descripción breve	Permeabilidad hidrológica
Arena	Suelo grueso, drenaje muy alto	Permeable
Franco arenoso	Arena con algo de limo/arcilla, buen drenaje	Permeable
Franco arenoso fino	Moderadamente permeable	Permeable
Franco	Equilibrio arena/limo/arcilla	Semipermeable
Franco limoso	Textura media, drenaje moderado	Semipermeable
Franco arcilloso	Contiene algo de arcilla, drenaje algo limitado	Semipermeable
Franco arcilloso limoso	Arcilloso fino	Semipermeable
Franco arcilloso arenoso	Compacto, baja permeabilidad	Semi impermeable
Arcilloso	Muy compacto, drenaje pobre	Impermeable
Arcilloso limoso	Arcilla fina con limo	Impermeable
Arcilloso arenoso	Arcilla gruesa, drenaje muy bajo	Impermeable

Fuente: Adaptado de clasificación USDA Soil Texture por el ingeniero Abel Carmona Arteaga

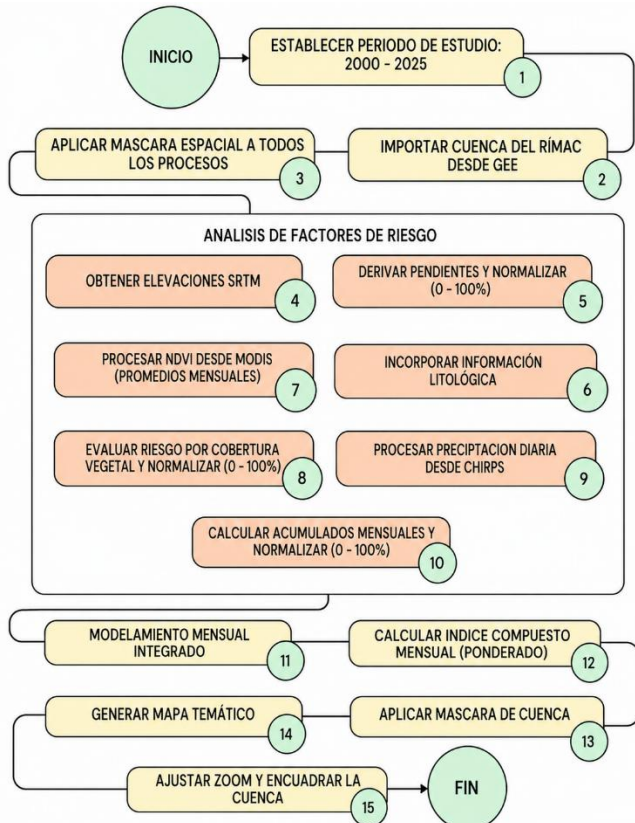


Fig 4. Diagrama de flujo de la secuencia de pasos que realizar el código de java script para obtener las zonas de riesgo dentro de la cuenca Rímac.

El cuadro de OpenLandMap presenta la clasificación de texturas del suelo según el sistema USDA, esencial para determinar la permeabilidad del terreno en el cálculo del coeficiente de escorrentía (C). Los suelos arenosos favorecen la infiltración y reducen la escorrentía, mientras que los arcillosos

o compactos tienden a generar mayor escurrimiento superficial. Esta clasificación permitió asignar categorías de permeabilidad (alta, media o baja) para su integración con pendiente y vegetación en el método racional, la clasificación se observa en la tabla 4.

Por su parte, el cuadro de SoilGrids muestra el porcentaje promedio de arena, limo y arcilla a distintas profundidades, caracterizando cuantitativamente la textura del suelo. Esto refina la estimación de la capacidad de infiltración, donde un mayor contenido de arcilla reduce la permeabilidad y aumenta C, mientras que la arena incrementa la infiltración y disminuye la escorrentía, esto se muestra en la tabla 5.

TABLA 5
 CLASIFICACIÓN APROXIMADA DE TEXTURA DEL SUELO SEGÚN
 PORCENTAJE DE ARENA Y ARCILLA

Condición (aproximada)	Descripción breve	Permeabilidad hidrológica
arena ≥ 70%	Arena/Muy permeable	Permeable
arena 50–70%, arcilla < 20%	Franco arenoso/Permeable	Permeable
arena 30–50%, arcilla 10–25%	Franco/Moderado	Semipermeable
arcilla 25–40%, arena < 40%	Franco arcilloso/Baja a media	Semipermeable
arcilla > 40%	Arcilloso/Muy baja permeabilidad	Impermeable

Fuente: Adaptado de USDA Soil Texture Triangle y guías hidrológicas del MTC (Perú) por el ingeniero Abel Carmona Arteaga

Ambas fuentes se complementan, verificando la clasificación textural y aumentando la fiabilidad del análisis. La integración de estos datos permite representar con mayor precisión el comportamiento hidráulico del terreno, reflejando cómo la textura influye en la magnitud de la escorrentía durante eventos de lluvia.

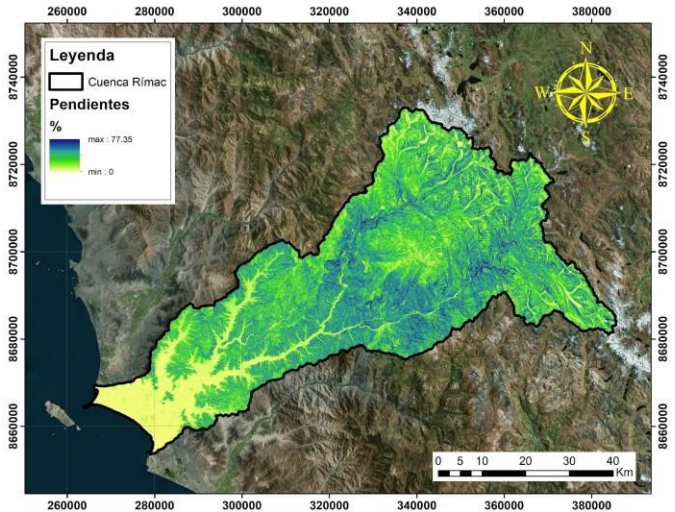


Fig 5. Representación gráfica de las pendientes dentro de la cuenca Rímac.

El mapa de pendientes derivado del SRTM que se observa en la figura 5, muestra un relieve marcadamente accidentado en la cuenca del río Jequetepeque, con valores que oscilan entre 0% y 100%. Las mayores pendientes se localizan en las zonas más elevadas, acelerando la velocidad del flujo superficial y limitando la infiltración. Por el contrario, las áreas llanas o de baja pendiente favorecen la retención y la infiltración del agua.

Este patrón hidrológico, modelado por la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana que formó la cordillera, define cómo se concentra y escurre el agua en la cuenca, influyendo directamente en la estimación del coeficiente de escorrentía (C).

Los datos de OpenLandMap y SoilGrids se procesaron en GEE, de lo cual se generaron mapas mensuales de la dinámica de escorrentía superficial para todo el año. Aunque se analizó el periodo de enero a diciembre, varios meses mostraron patrones muy similares; por ello, en esta sección se presentan únicamente tres meses representativos que capturan la tendencia observada en el resto del periodo.



Fig 6. Corrida de código de Coeficiente C en GEE para la cuenca Rímac.

La Figura 6 ilustra el flujo de trabajo del código, que realiza el análisis temporal y exporta automáticamente los mapas resultantes en formato GeoTIFF a Google Drive, para su posterior procesamiento en ArcGIS. Este patrón hidrológico, modelado por la subducción de las placas.

Para obtener estos datos se utilizó el código realizado en Java script realizado por el Ing. Mg.Sc. Abel Carmona Arteaga [21].

En la Figura 7 se muestra la distribución espacial del coeficiente de escorrentía (C) para abril en la cuenca del río Rímac. La zona noreste presenta principalmente valores medios y altos de C (tonos amarillos y rojos), lo que indica baja capacidad de infiltración, coherente con el final de la temporada de lluvias de verano y la saturación de los suelos, que favorece la escorrentía superficial. En contraste, la zona suroeste, cercana a la costa, registra valores bajos de C (tonos azules y celestes), asociados a una menor generación de escorrentía, influenciada por pendientes más marcadas, mejor drenaje y diferencias en el uso y cobertura del suelo.

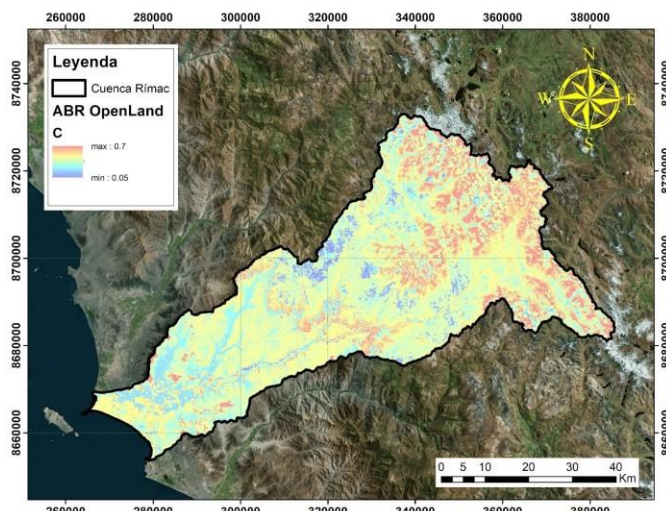


Fig 7. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de abril.

En la Figura 8 se muestra la distribución espacial del coeficiente de escorrentía (C) para el mes de junio, donde predominan las tonalidades amarillas y azul claro, que representan valores medios a bajos de C, asociados a una mayor capacidad de infiltración y menor generación de escorrentía superficial, principalmente en los sectores medios y bajos. En contraste, las áreas con tonos rojizos indican valores más elevados del coeficiente, concentrándose en zonas de mayor pendiente y suelos menos permeables, ubicadas hacia la parte alta. Esta configuración espacial refleja una respuesta hidrológica heterogénea, controlada por la topografía, la permeabilidad del suelo y la cobertura vegetal durante el periodo seco.

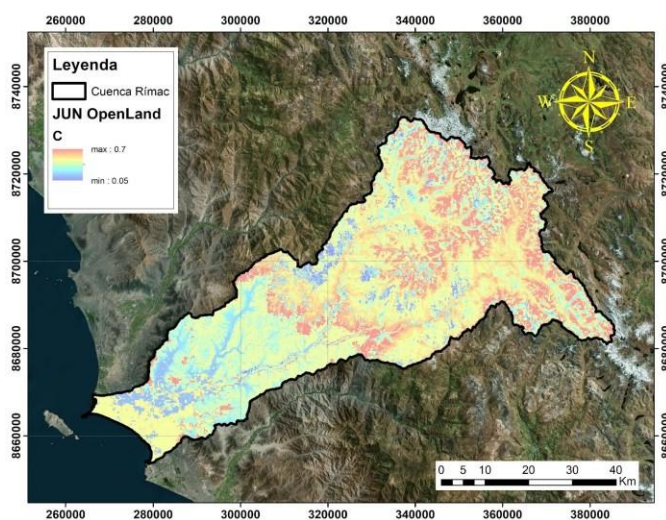


Fig 8. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de junio.

En la distribución espacial del coeficiente de escorrentía (C) para el mes de diciembre, en la figura 9, se aprecia una mayor presencia de tonalidades amarillas y rojizas, las cuales representan valores medios a altos de C y, por tanto, una mayor tendencia al escurrimiento superficial. Este comportamiento se asocia al inicio del periodo húmedo, donde el incremento de la precipitación, junto con pendientes pronunciadas y suelos de menor permeabilidad, favorecen la reducción de la infiltración. Las áreas con tonos azul claro, concentradas principalmente en los sectores bajos, reflejan valores menores de C, vinculados a superficies más planas y con mayor capacidad de retención. En conjunto, el patrón espacial evidencia un aumento del potencial de escorrentía en comparación con los meses secos.

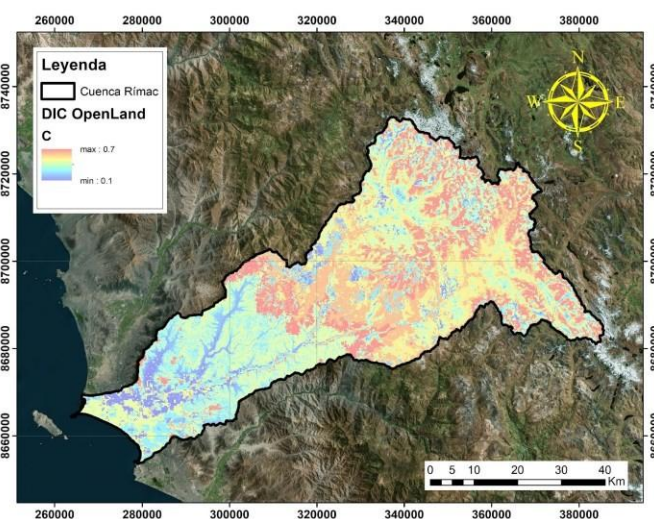


Fig 9. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de diciembre.

Se observa en la figura 10, que en el mapa del mes de abril predominan las tonalidades azul claro y amarillas, que representan valores medios del coeficiente de escorrentía (C), asociados a una capacidad de infiltración moderada. Las zonas con tonos rojizos indican valores más altos de C y se concentran en sectores de mayor pendiente y suelos menos permeables, donde el escurrimiento superficial es más significativo. En general, la distribución espacial refleja una condición de transición entre el periodo húmedo y el periodo seco.

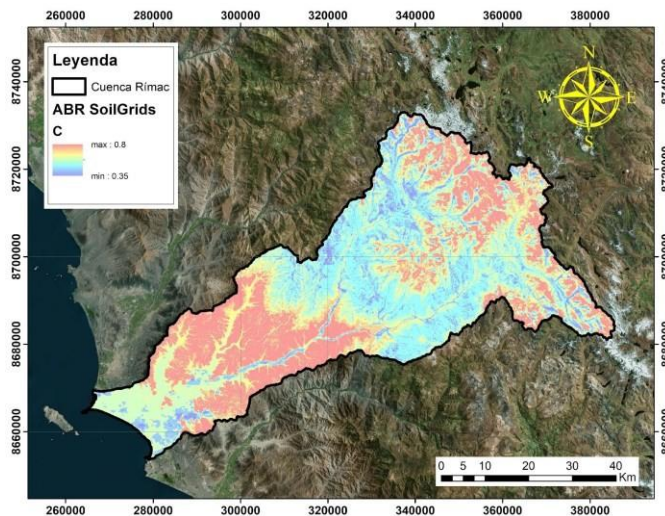


Fig 10. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de abril.

En el mapa correspondiente al mes de junio, figura 11, predominan las tonalidades amarillas y azul claro, que representan valores medios del coeficiente de escorrentía (C), asociados a una mayor capacidad de infiltración durante el periodo seco. Las áreas con tonos rojizos indican valores más altos de C y se concentran principalmente en sectores con mayor pendiente y suelos menos permeables, donde el escurrimiento superficial resulta más significativo. En conjunto, la distribución refleja un comportamiento hidrológico moderado con focos localizados de mayor escorrentía.

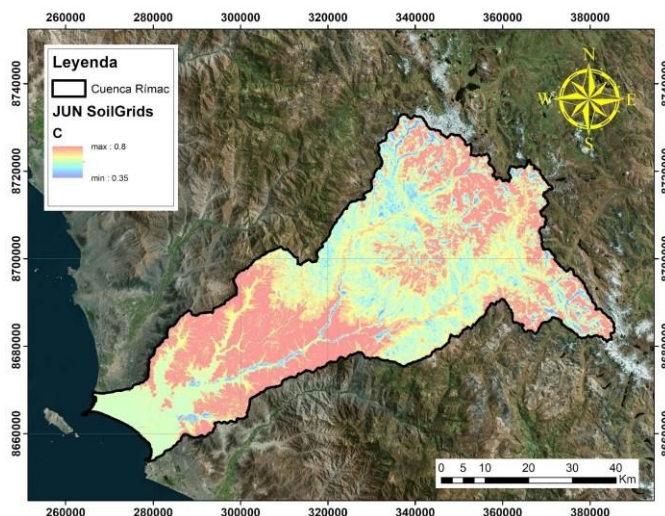


Fig 11. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de junio.

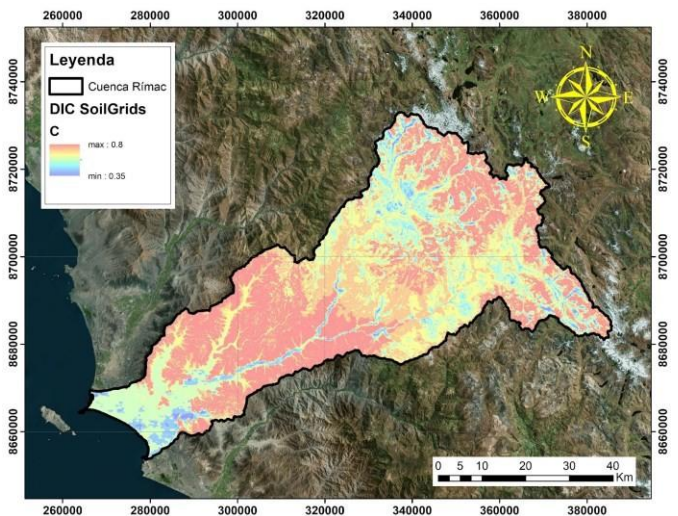


Fig 12. Representación espacial del mapa del coeficiente de escorrentía C dentro de la cuenca Rímac para el mes de diciembre.

En la Figura 12 se presenta la distribución espacial del coeficiente de escorrentía para el mes de diciembre. En este mapa se observa un predominio marcado de tonalidades rojizas y anaranjadas que cubren gran parte de la cuenca media y alta, indicando valores elevados de C (cercanos a 0.8). Este patrón refleja una respuesta hidrológica crítica asociada al inicio del periodo húmedo, donde la saturación de los suelos y las pendientes pronunciadas reducen drásticamente la capacidad de infiltración, favoreciendo la generación de escorrentía superficial. Por el contrario, las tonalidades azules, que denotan valores bajos de escorrentía y mayor permeabilidad, se encuentran restringidas casi exclusivamente al sector más bajo de la cuenca, evidenciando un incremento generalizado del potencial de flujo superficial en comparación con los meses secos.

Con el fin de realizar un análisis integrador, se compararon los resultados obtenidos a partir de los datasets OpenLandMap y SoilGrids para los meses representativos evaluados (abril, junio y diciembre). En términos generales, ambos enfoques presentan una distribución espacial similar del coeficiente de escorrentía (C), identificando valores altos en las zonas altas y medias de la cuenca y valores bajos en las zonas cercanas a la costa. Esto evidencia una coherencia en la representación del comportamiento hidrológico del área de estudio.

No obstante, se identifican diferencias puntuales en la magnitud y extensión de las zonas con valores elevados de C. SoilGrids tiende a mostrar una mayor continuidad en áreas con alta escorrentía, lo cual puede estar asociado a su carácter cuantitativo basado en porcentajes de textura del suelo. Por su parte, OpenLandMap, al emplear clases texturales categóricas, presenta una distribución más segmentada. Esta comparación permite evidenciar que, si bien ambos datasets son adecuados para la estimación espacial del coeficiente de escorrentía, su uso conjunto mejora la confiabilidad del análisis al reducir la incertidumbre asociada a la caracterización de la permeabilidad del suelo.

VII. CONCLUSIONES

El estudio evidenció una marcada variabilidad espacial y estacional del coeficiente de escorrentía en la cuenca del río Rímac, confirmando que este parámetro responde a la interacción entre la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las propiedades del suelo. Los resultados muestran que las zonas altas y medias concentran los valores más elevados de escorrentía, mientras que las zonas bajas presentan, en general, coeficientes menores, reflejando un comportamiento hidrológico heterogéneo a escala de cuenca.

El análisis estacional permitió identificar un incremento del coeficiente de escorrentía durante los meses húmedos y de transición, asociado a la saturación del suelo y a condiciones topográficas desfavorables para la infiltración, lo que incrementa la susceptibilidad a escurrimientos superficiales. En contraste, durante el periodo seco predominan valores moderados, aunque persisten áreas críticas vinculadas a pendientes pronunciadas y suelos de baja permeabilidad.

La incorporación conjunta de los productos OpenLandMap y SoilGrids permitió una caracterización más robusta de la permeabilidad del suelo, fortaleciendo la estimación del coeficiente de escorrentía y reduciendo la incertidumbre asociada a enfoques convencionales. En conjunto, la metodología propuesta constituye una herramienta útil para la evaluación preliminar del riesgo hidrológico y el apoyo al diseño hidráulico en la cuenca del río Rímac, con potencial de aplicación en otras cuencas con limitada información hidrométrica.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "El caudal del río Rímac se incrementó en 35,0 % en octubre de 2024," Gob.pe, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/1065482-caudal-rio-rimac-se-incremento-en-35-0-en-octubre-de-2024>
- [2] ATV Noticias, "Vecinos y casas en peligro tras crecidas del río Lurín y el río Rímac," ATV.pe, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.atv.pe/noticia/vecinos-y-casas-en-peligro-tras-crecidas-del-rio-lurin-y-el-rio-rimac/>
- [3] Exitosa Noticias, "Cerca de 50 familias están en peligro inminente por crecida del río Rímac," 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.exitosanoticias.pe/actualidad/cerca-50-familias-estan-peligro-inminente-crecida-rio-rimac-advierde-defensoria-pueblo-n142506>
- [4] Infobae Perú, "Río Rímac aumenta su caudal en plena alerta naranja por lluvias en la sierra central; está muy peligroso," Infobae, 16 ene. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/peru/2026/01/16/rio-rimac-aumenta-su-caudal-en-plena-alerta-naranja-por-lluvias-en-la-sierra-central-esta-muy-peligro>
- [5] V. T. Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill, 1988.
- [6] V. P. Singh, *Elementary Hydrology*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1992.
- [7] D. R. Maidment, *Handbook of Hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill, 1993.
- [8] Google Earth Engine, "Google Earth Engine," Google Earth Education. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/intl/es_in/earth/education/tools/google-earth-engine/
- [9] E. Nkiaka, R. G. Bryant, and M. Dembélé, "Assessment of vegetation dynamics and its influence on hydrological processes using NDVI and remote sensing techniques," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 9, no. 1, pp. 491–504, 2024, doi: 10.1007/s41748-024-00464-3.
- [10] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Diagnóstico de género: acceso y participación en la gestión del agua en la cuenca del río Rímac*, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-genero-acceso-participacion-gestion-agua-cuenca-rio>
- [11] Autoridad Nacional del Agua (ANA), *Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas en la cuenca del río Rímac*, Lima, Perú, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3030>
- [12] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau y R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [13] Z. Ma, S. Yang, B. Shao, F. Monteith y L. Zhai, "A Review of ArcGIS Spatial Analysis in Chinese Archaeobotany: Methods, Applications, and Challenges," *Quaternary*, vol. 8, no. 4, p. 62, 2025. doi: 10.3390/quat8040062.
- [14] C. López-Montecinos, *Fundamentos básicos para la teledetección ambiental*, Universidad Católica del Norte, Chile, 2019. doi:10.13140/RG.2.2.20684.44161. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/343295557_Fundamentos_Basicos_para_la_Teledeteccion_Ambiental
- [15] R. Peña Barrera y E. Caicedo Sterling, Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) en la zona oriente del departamento del Tolima, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2019.
- [16] U.S. Geological Survey (USGS), "Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global," USGS. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc-second-global>
- [17] T. Hengl, *Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m*, Version v02, Zenodo, 2018. doi:10.5281/zenodo.1475451. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1475451>.
- [18] ISRIC – World Soil Information, "SoilGrids – global gridded soil information," SoilGrids250m v2.0. [En línea]. Disponible en: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>
- [19] NASA LP DAAC, *MODIS/006/MOD13Q1 Vegetation Indices 16-Day Global 250 m*, NASA Earthdata. [En línea]. Disponible en: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_006_MOD13Q1
- [20] MTC, Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje, Lima, Perú: MTC, 2014. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4443017-20-2011-mtc-14>
- [21] Abel Carmona Arteaga, "Código en Google Earth Engine COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO (C) - MTC PERÚ (Mensuales)," 2025. [En línea]. Disponible en: <https://code.earthengine.google.com/415767f8cfbefda25c579b74615e476f>