

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.44.01.012.252>

Integración de teledetección y SIG para estimar C, CN y actualizar curvas IDF en el departamento del Cauca (Colombia)

*Remote sensing–GIS integration for
estimating C, CN, and updating IDF curves
in the Cauca department (Colombia)*

OSCAR FELIPE AGREDO-CAMPUZANO *

DAYANNA LIZETH JIMÉNEZ-BARÓN **

ANDREA MARCELA BOLAÑOS-RODRÍGUEZ ***

MARÍA JIMENA PAREDES-GUEVARA ****

* Profesor asistente, Universidad del Cauca, Popayán (Colombia), Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología (GIHH). Magíster en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica. Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-2509-2912>. felipeagredo@unicauca.edu.co

** Ingeniería Ambiental, Ingeniería Civil y Especialización en Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad del Cauca, Popayán (Colombia), Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología (GIHH). Orcid-ID: <https://orcid.org/0009-0006-3098-5164>. dljimenez@unicauca.edu.co

*** Profesora asistente, Universidad del Cauca, Popayán (Colombia), Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología (GIHH). Magíster en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica. Orcid-ID: <https://orcid.org/0009-0009-4435-8497>. andreamarcela@unicauca.edu.co

**** Profesora asistente, Universidad del Cauca, Popayán (Colombia), Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología (GIHH). Magíster en Ingeniería Hidráulica e Hidrológica. Orcid-ID: <https://orcid.org/0009-0009-8528-4375>. mjparedes@unicauca.edu.co

Correspondencia: Oscar Felipe Agredo-Campuzano. Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica, carrera 2 n.º 15N esquina, Campus Tulcán, ofic. 441, Popayán, Cauca (Colombia). Celular: +573054064387.



Resumen

Este estudio desarrolla dos herramientas complementarias que integran tele-detección y SIG para fortalecer la gestión hidrológica del departamento del Cauca (Colombia). La primera, metodológica, combina un modelo de elevación digital derivado de imágenes ALOS-PALSAR, con mapas de coberturas (IDEAM) y mapas de suelos (IGAC) para estimar objetivamente los coeficientes de escorrentía (C) y los números de curva (CN) en 41 cuencas que abarcan aproximadamente el 50 % del territorio. Se encontró una correlación C-CN significativa ($R^2 = 0,71$). Todo el flujo de trabajo se automatizó en la aplicación “C_CN_Calculator”. La segunda, informática, procesa series de 86 estaciones pluviométricas activas (IDEAM) (≥ 15 años) y, mediante análisis de datos dudosos, pruebas de bondad de ajuste, y aplicando el método simplificado se obtienen las precipitaciones para diferentes tiempos de retorno, así como las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF); los resultados se publican en una plataforma web interactiva (ArcGIS Online) que agiliza la consulta y descarga de insumos para estudios y diseños hidráulicos. La integración de ambas herramientas unifica criterios antes dispersos, acelera los cálculos hidrológicos y ofrece una base técnica replicable que incrementa la resiliencia territorial frente a eventos extremos.

Palabras clave: coeficiente de escorrentía, curvas IDF, hidrología, número de curva, SIG.

Abstract

This study develops two complementary tools that combine remote sensing and GIS to strengthen hydrological management in the Cauca Department (Colombia). The first, a methodological tool, merges a digital elevation model derived from ALOS-PALSAR imagery with land-cover (IDEAM) and soil maps (IGAC) to objectively estimate runoff coefficients (C) and Curve Numbers (CN) in 41 watersheds, covering ~50% of the department, and yields a significant C-CN correlation ($R^2 = 0.71$). The entire workflow is automated in the “C_CN_Calculator” application. The second, an informatics tool, processes records from 86 active rain gauges (IDEAM) (≥ 15 years); after outlier screening, goodness-of-fit testing, and the simplified method, it computes precipitation for multiple return periods and generates intensity-duration-frequency (IDF) curves. All results are published on an interactive ArcGIS Online platform, expediting data retrieval for hydraulic design and risk management. By standardizing procedures that were previously scattered, the integration of these tools accelerates hydrological calculations and provides a replicable technical framework that enhances regional resilience to extreme hydrometeorological events.

Keywords: curve number, GIS, hydrology, IDF curves, runoff coefficient.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos y la evaluación de la escorrentía son fundamentales para el diseño de infraestructuras hidráulicas resilientes, particularmente en regiones como el departamento del Cauca (Colombia), caracterizadas por alta variabilidad climática, topográfica y de uso del suelo. En nuestra experiencia profesional y académica en esta región, ha sido evidente que comprender la escorrentía implica analizar con precisión parámetros como el coeficiente de escorrentía (C) y el número de curva (CN), ambos esenciales para modelar procesos hidrológicos, prever impactos y diseñar medidas de mitigación ante eventos extremos [1].

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) también cumplen un papel clave en la hidrología aplicada, ya que permiten estimar caudales de diseño y dimensionar obras hidráulicas con base en la frecuencia e intensidad de lluvias [2]. No obstante, en el Cauca, parte de la información meteorológica disponible se encuentra fragmentada o poco sistematizada, lo que representa una limitación recurrente en el desarrollo de proyectos de planificación y diseño hidráulico [3].

Métodos ampliamente usados, como el racional o el hidrograma unitario sintético del SCS (Soil Conservation Service), dependen directamente de una adecuada caracterización de C y CN. Mientras C estima la fracción de lluvia convertida en escorrentía superficial, el CN incorpora información sobre el tipo de suelo, cobertura vegetal y condiciones hidrológicas [4]. Sin embargo, se ha observado que la relación entre ambos parámetros rara vez se aborda de manera integrada, lo cual reduce la precisión de los modelos hidrológicos convencionales [5].

En este contexto, este estudio plantea tres objetivos principales: (i) caracterizar 41 cuencas del Cauca y establecer la relación entre C y CN mediante herramientas SIG y análisis estadístico; (ii) generar curvas IDF para 86 estaciones a partir de distribuciones de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste [6]; y (iii) desarrollar una plataforma web interactiva que facilite el acceso y aplicación de esta información en contextos técnicos, académicos y de gestión del riesgo [7].

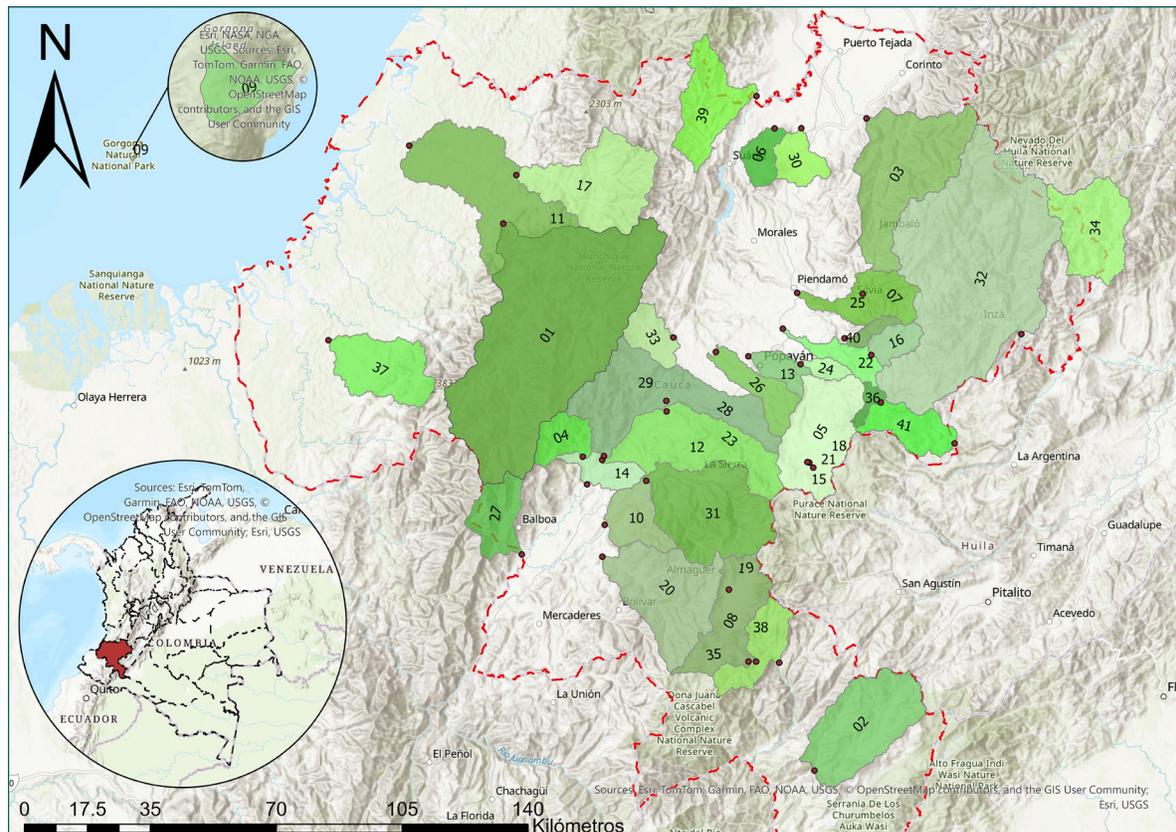
Los resultados se difunden mediante una plataforma web interactiva (ArcGIS Online) que simplifica la consulta y descarga de insumos para proyectos hidráulicos. Esta integración estandariza criterios antes dispersos, agiliza el procesamiento hidrológico y crea una base técnica reproducible que refuerza la resiliencia territorial frente a eventos extremos. Con ello, el estudio no solo profundiza el entendimiento hidrológico regional, sino que también ofrece soluciones prácticas para el Cauca: la correlación entre C y CN, la generación de curvas IDF y su publicación abierta son aportes concretos hacia una gestión hídrica más informada, accesible y robusta ante el cambio climático.

METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en cinco fases: (A) descripción de la zona de estudio; (B) recopilación y procesamiento de información; (C) cálculo de C y CN; (D) generación de curvas IDF y (E) visualización de resultados en una plataforma web de libre acceso.

Descripción de la zona de estudio

El estudio se desarrolló en el departamento del Cauca (Colombia), región clave en términos hídricos, con una superficie de 29 308 km² y cinco cuencas hidrográficas principales: Alto Cauca, Alto Magdalena, Caquetá, Pacífico y Patía [8]. Se analizaron 41 cuencas instrumentadas, que representan el 52,35 % del territorio, y se consideraron datos de 86 estaciones meteorológicas, con una densidad de una estación por cada 340 km².



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas del software ArcMap.

FIGURA 1. ZONA DE ESTUDIO (ESTACIONES IDEAM LIMNIMÉTRICAS Y LIMNIGRÁFICAS) Y LOCALIZACIÓN DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA EN COLOMBIA

Recopilación y procesamiento de información

Se recopilaron datos hidrometeorológicos y geoespaciales de fuentes oficiales:

modelos digitales de elevación (ALASKA FACILITY) [9], mapas de cobertura [10] generados a partir de imágenes satelitales (EARTH-EXPLORER) [11] y tipos de suelo (IGAC) [12], y series históricas de precipitación máxima diaria (IDEAM) [13].

El procesamiento inició con la verificación de consistencia y completitud de los datos en MS Excel y R [14]. Los valores faltantes se completaron utilizando el método del promedio o, en su defecto, con datos de estaciones cercanas [1]. Las series presentaron buena calidad, con menos del 5 % de datos que tuvieron que ser completados. Se aplicó también el análisis de datos dudosos propuesto por el Water Resources Council [15]. Para los datos geoespaciales, se realizaron operaciones en ArcMap 10.8, como recortes, uniones (“dissolve” y “union”) y reclasificaciones, con el fin de consolidar unidades homogéneas según características hidrológicas.

Cálculo de C y CN

El cálculo de los parámetros hidrológicos claves incluyó el coeficiente de escorrentía (C) y el número de curva (CN-II). Para su estimación, los suelos fueron clasificados en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D), con base en su textura, capacidad de infiltración y propiedades de drenaje.

La textura del suelo es un factor determinante en procesos físicos, químicos y biológicos, ya que influye en la retención y movimiento del agua, la resistencia mecánica y el potencial de lixiviación de contaminantes. Por ello, es fundamental en el diseño hidráulico y la gestión del recurso hídrico.

Según el tamaño de partículas menores de 2 mm, la textura se clasifica en arenas (2-0,02 mm), limos (0,02-0,002 mm) y arcillas (<0,002 mm) [16]. A partir de estas fracciones, los suelos se agrupan en texturas gruesas (arenosas), medias (francas) y finas (arcillosas).

Los suelos se clasificaron, según INVIAS [17], en cuatro grupos hidrológicos:

Grupo A (bajo potencial de escorrentía): suelos arenosos o gravosos, bien drenados, con alta infiltración incluso en condiciones húmedas.

Grupo B (moderadamente bajo): suelos de textura moderada, bien drenados, con tasas de infiltración intermedias.

Grupo C (moderadamente alto): suelos con estratos restrictivos o texturas finas, que presentan infiltración lenta.

Grupo D (alto potencial de escorrentía): suelos arcillosos o poco profundos sobre capas impermeables, con infiltración muy lenta.

Esta clasificación se aplicó a los polígonos de suelos mediante sus unidades cartográficas [10].

TABLA 1. EJEMPLO DE CLASIFICACIÓN DE TIPO DE SUELO SEGÚN LOS AUTORES

UCS	Característica	Tipo	Justificación
MKB	Profundos a muy profundos, bien drenados, texturas moderadamente gruesas y gruesas, extremada a fuertemente ácidos, alta saturación de aluminio, erosión ligera a moderada y fertilidad baja.	A	Pese a tener texturas moderadamente gruesas, la gran profundidad, la alta capacidad de drenaje y una fertilidad baja son características propias de suelos tipo A.
MLB	Moderadamente profundos, texturas moderadamente finas, excesivamente drenados, fuertemente ácidos, fertilidad moderada, altos en materia orgánica;	B	Tiene profundidad en los rangos de suelo tipo B, aunque muy drenados, texturas moderadamente finas y una fertilidad moderada, una cantidad considerable de materia orgánica, por lo que no es 100 % un suelo arenoso.
LQB	Profundos a muy superficiales, moderados a bien drenados, texturas moderadamente gruesas a finas, fuerte a ligeramente ácidos, alta saturación de aluminio, erosión moderada y fertilidad baja moderada	C	Tiene profundidad en los rangos de suelo tipo C, cuentan con una capacidad de drenaje intermedia, la erosión y fertilidad moderada son características de este tipo de suelo.
MHF	Muy superficiales por encharcamientos permanentes, muy pobremente drenados, texturas orgánicas, extremadamente ácidos, alta saturación de fertilidad moderada a baja.	D	Poca profundidad y muy baja capacidad de drenaje son características propias de tipo de suelo D, la presencia de materia orgánica y fertilidad moderada también son indicativos de la presencia de gravas y arcillas.

Fuente: elaboración propia con base en información del IGAC [12].

Posteriormente, se caracterizaron las pendientes del terreno a partir de modelos de elevación digital, procesados en software SIG. Estas se reclasificaron en cuatro clases, según INVIAS [17]: plano (0-5 %), ondulado (5-10 %), montañoso (10-30 %) y escarpado (>30 %).

Se realizaron intersecciones espaciales entre los mapas de cobertura, suelos y pendiente para estimar el coeficiente de escorrentía (C) ponderado en cada cuenca. De forma similar, se cruzaron cobertura y suelos para obtener el número de curva (CN) ponderado. Este procedimiento se ejecutó en ArcMap mediante las funciones “union” y “dissolve”, lo cual generó polígonos homogéneos en función de las variables clave.

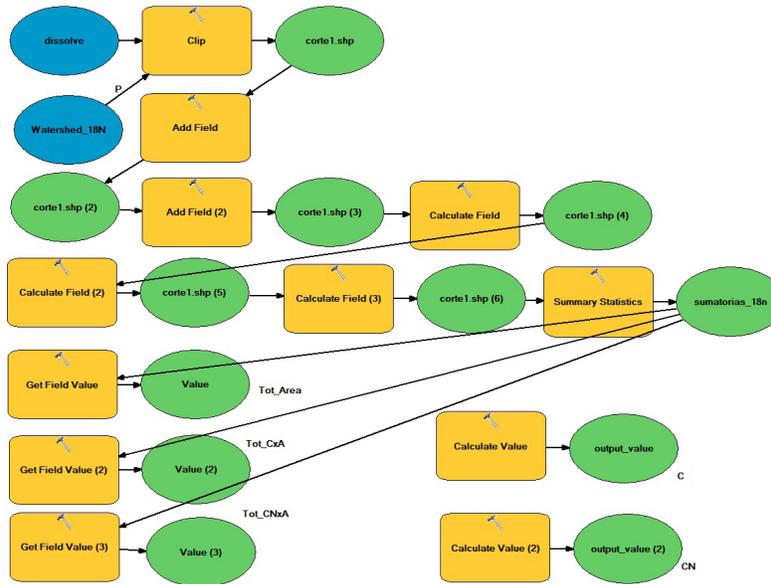
A cada polígono se le asignó un valor de C y CN con base en tablas bibliográficas [18], [19], que clasifican los parámetros según el tipo de suelo, la cobertura vegetal y el grupo hidrológico del suelo. Algunos de los criterios utilizados se presentan en la tabla 2.

TABLA 2. EJEMPLO DE CLASIFICACIÓN DE COEFICIENTES C Y CN
SEGÚN LOS AUTORES

Leyenda	C (1 para cuerpos de agua, y mismo valor de arcilloso para zonas urbanas y suelos A: Franco arenoso, suelos B y C: Franco limo arcilloso y suelos D: Arcilloso)	CN (100 para cuerpos de agua, y mismo valor de D para zonas urbanas y condición hidrológica regular mayormente*)
1.1.1. Tejido urbano continuo	Casas multifamiliares unidas 0,75	Áreas permeables conformadas (según clasificación hidrológica) 76, 87, 91 o 94
2.3.1. Pastos limpios	Pastos (según pendiente) 0,1, 0,16, 0,22 o 0,3, 0,36, 0,42 o 0,4, 0,55, 0,6	Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno, 30, 58, 71 y 78
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Pastos y cultivos (según pendiente), valores promedio de los dos componentes (0,1-0,3), (0,16-0,4), (0,22-0,52) o (0,3-0,5), (0,36-0,6), (0,42-0,72) o (0,4-0,6), (0,55-0,7), (0,6-0,82)	Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno y cultivo en hileras, hileras rectas, valores promedio de los dos componentes, (30-69,5*), (58-79,5*), (71-86,5*) o (78-90*)
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Cultivos, pastos y bosques (según pendiente), valores promedio de los tres componentes (0,3-0,1-0,1), (0,4-0,16-0,25), (0,52-0,22-0,3) o (0,5-0,3-0,3), (0,6-0,36-0,35), (0,72-0,42-0,5) o (0,6-0,4-0,4), (0,7-0,55-0,5), (0,82-0,6-0,6)	Cultivo en hileras, hileras rectas, Prados continuos, protegido de pastoreo, y generalmente segados para heno y Bosques, condición hidrológica buena, valores promedio de los tres componentes, (69,5*-30-30), (79,5*-58-55), (86,5*-71-70) o (90*-78-77)
3.1.1. Bosque denso	Bosques (según pendiente) 0,1, 0,25, 0,3 o 0,3, 0,35, 0,5 o 0,4, 0,5, 0,6	Bosques, condición hidrológica buena, 30, 55, 70 y 77
3.2.2. Arbustal	Pastos y bosques (según pendiente), valores promedio de los dos componentes (0,1-0,1), (0,16-0,25), (0,22-0,3) o (0,3-0,3), (0,36-0,35), (0,42-0,50) o (0,4-0,4), (0,55-0,5), (0,6-0,6)	Combinación de bosques y pastos (huer-tas o granjas con árboles), condición hidrológica regular, 43, 65, 76 y 82
3.3.2. Afloramientos rocosos	0,9	90
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	0,9	90
5.1.1. Ríos (50 m)	1	100
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	1	100
9.9. Nubes	Se realiza la correspondencia con los polígonos cercanos	Se realiza la correspondencia con los polígonos cercanos

Fuente: elaboración propia con base en información del IDEAM [10], del INVIAS [17] y [19].

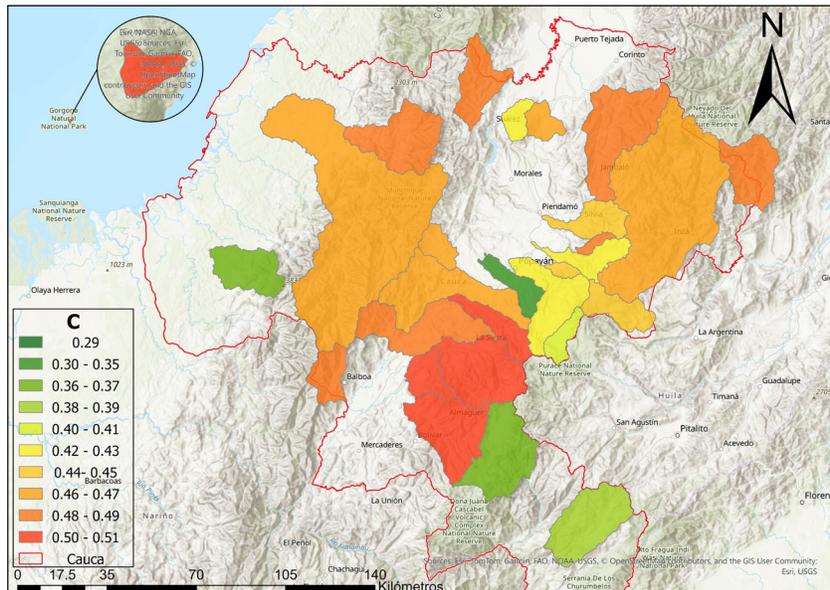
Con la capa vectorial (cobertura, suelos y pendiente) se desarrolló una herramienta automatizada denominada *C_CN_Calculator*, implementada en Model Builder, que permite estimar ambos parámetros para cualquier polígono dentro del área.



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas del software ArcMap.

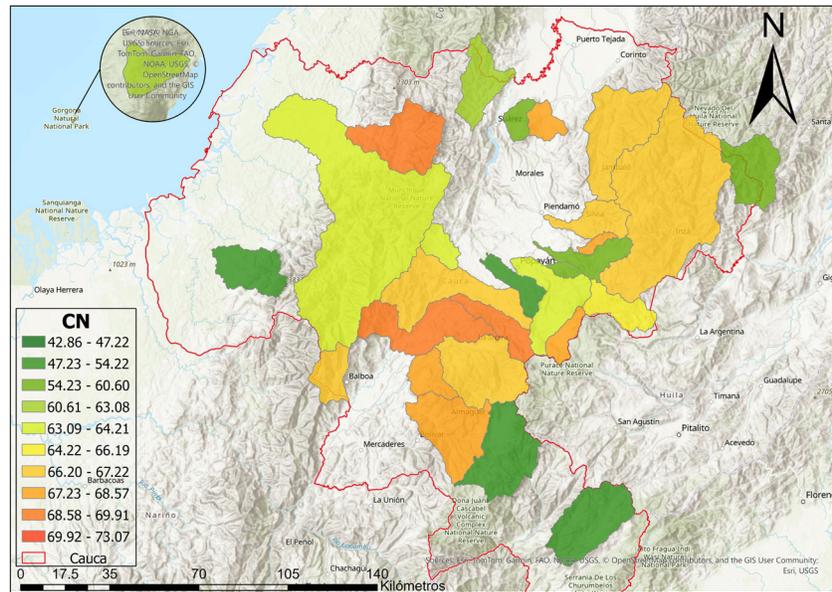
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO CÁLCULO DE C Y CN PARA CUALQUIER POLÍGONO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se completó así la estimación de C y CN para las 41 cuencas analizadas, cuya distribución espacial se presenta en la figura 3.



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas del software ArcMap.

FIGURA 3.A. MAPA DE C PARA EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas del software ArcMap.

FIGURA 3.B. MAPA DE CN PARA EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA

Posteriormente, se aplicó un análisis de correlación y regresión lineal simple entre C y CN. Se evaluó la normalidad de los datos, su correlación y significancia estadística mediante el software SPSS. La relación obtenida mostró un coeficiente de determinación $R^2 = 0,708$, lo cual indica una asociación significativa entre ambas variables.

Para validar el modelo, se utilizaron datos de una cuenca caracterizada mediante vuelos de radar. La diferencia con respecto al modelo estimado fue del 16 %, lo que confirma su confiabilidad.

Generación de curvas IDF

La metodología para la generación de curvas IDF se estructuró en cuatro fases. En la primera, se solicitó y recopiló información de precipitación máxima diaria en 24 horas de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas del IDEAM [13], procesando los valores máximos multianuales mediante tablas dinámicas en MS Excel.

En la segunda fase se aplicaron los procedimientos de limpieza, verificación y completitud de datos previamente descritos [1], [14], [15], garantizando la calidad de las series y la detección de valores atípicos. Posteriormente, se ajustaron distribuciones de probabilidad para distintos periodos de retorno, consolidando un conjunto robusto de curvas IDF para el departamento del Cauca.

En la tercera fase se elaboraron las curvas IDF utilizando metodologías aceptadas por la normativa vigente [2], [17], para períodos de retorno de 2 a 100 años y duraciones entre 10 y 360 minutos, con la ecuación de lluvias correspondiente (ver la ecuación 1):

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{\left(\frac{t_c}{60}\right)^c} \quad (1)$$

Donde los parámetros a, b, c y d dependerán de la zona en la que se encuentra la estación; para el departamento del Cauca se tiene zona andina (0.94, 0.18, 0.66 y 0.83) y zona pacífica (13.92, 0.19, 0.58 y 0.20). El valor de M se conoce como la precipitación máxima promedio anual en 24 horas multianual [17], la variable T corresponde al periodo de retorno en años, y el valor de t_c será la duración de la lluvia, en minutos.

Durante la cuarta y última fase se aplicaron análisis de frecuencias, distribuciones de probabilidad y pruebas de bondad de ajuste, lo que permitió proyectar los valores correspondientes a precipitación máxima en 24 horas distintos escenarios de diseño y/o periodos de retorno.

Visualización de resultados en una plataforma web de libre acceso

Finalmente, los resultados fueron integrados en un portal web interactivo que facilita el acceso y uso de las curvas IDF en procesos de planificación y diseño hidrológico e hidráulico.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Durante la estimación de los coeficientes de escorrentía (C) y números de curva (CN-II), se determinó el porcentaje de área según tipos de suelo, clases de pendiente y coberturas del terreno. Estos resultados se presentan en las tablas 4, 5 y 6. En la tabla 3 se evidencia el predominio de suelos tipo C (50,48 %), caracterizados por infiltración lenta y potencial de escorrentía moderadamente alto. En cuanto a coberturas (tabla 5), el bosque denso representa el 33,67 % del área, seguido del mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (13,16 %), reflejando una coexistencia entre ecosistemas naturales y actividades productivas, con implicaciones en la degradación de cuencas y riesgos por transporte en masa [20].

TABLA 3. PORCENTAJE DE ÁREA PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO

Tipo de suelo	Área total (km ²)	% Área
A	1.695,2304	11.05
B	5.696,1926	37.13
C	7.745,9439	50.48
D	142,8438	0.93
CA	44,5791	0.29
ZU	18,400	0.12
Total	15.343,19	100%

Fuente: elaboración propia.

TABLA 4. PORCENTAJE DE ÁREA PARA DIFERENTES RANGOS DE PENDIENTE

Rango	Pendiente	Área (km ²)
0-5%	Plano	840,42
5-10%	Ondulado	1.355
10-30%	Montañoso	6.396,89
>30%	Escarpado	6.750,88
	Total	15.343,19

Fuente: elaboración propia.

TABLA 5. PORCENTAJE DE ÁREA PARA DIFERENTES COBERTURAS

Cobertura de suelo	Área (km ²)	% Área
Tejido urbano continuo	17,36	0,11
Tejido urbano discontinuo	7,52	0,05
Zonas industriales o comerciales	0,1	0,00
Aeropuertos	1,5	0,01
Zonas de extracción minera	1,18	0,01
Otros cultivos transitorios	0,26	0,00
Cultivos permanentes herbáceos	3,95	0,03
Cultivos permanentes arbustivos	261,84	1,71
Cultivos agroforestales	1	0,01
Pastos limpios	1.261,89	8,22
Pastos arbolados	25,94	0,17

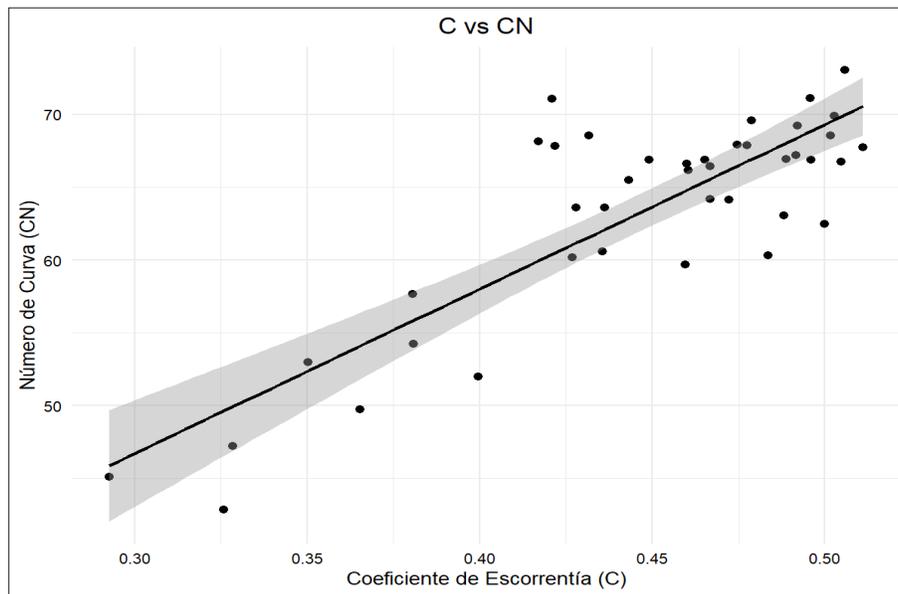
Continúa...

Pastos enmalezados	497,05	3,24
Mosaico de cultivos	3,36	0,02
Mosaico de pastos y cultivos	766,24	4,99
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2.019,89	13,16
Mosaico de pastos con espacios naturales	1.448,79	9,44
Mosaico de cultivos con espacios naturales	325,61	2,12
Bosque denso	5.165,58	33,67
Bosque abierto	79,02	0,52
Bosque fragmentado	606,17	3,95
Bosque de galería y ripario	47,59	0,31
Plantación forestal	80,5	0,52
Herbazal	890,23	5,80
Arbustal	751,88	4,90
Vegetación secundaria o en transición	924,22	6,02
Zonas arenosas naturales	15,1	0,10
Afloramientos rocosos	23,03	0,15
Tierras desnudas y degradadas	42,77	0,28
Zonas quemadas	7,17	0,05
Zonas glaciares y nivales	10,37	0,07
Ríos (50 m)	39,64	0,26
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,91	0,01
Nubes	15,54	0,10
Total	15.343,19	100%

Fuente: elaboración propia con base en información del IDEAM [10].

Con los valores estimados de C y CN (tabla 6) se elaboró un diagrama de dispersión que mostró una relación lineal significativa ($R^2 = 0,708$), como se observa en la figura 4, con su respectiva ecuación de correlación (ver ecuación 2).

$$CN = (112,990 \times C) + 12,812 \quad (2)$$



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas del software SPSS.

FIGURA 4. DIAGRAMA DE DISPERSIÓN PARA SERIE DE PUNTOS C Y CN

El análisis estadístico se desarrolló en SPSS, incluyendo la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov (K-S), cuyos resultados ($p = 0,011$ para C y $p = 0,000$ para CN) indicaron que los datos no siguen una distribución normal, por lo cual se justifica el uso de métodos no paramétricos.

Se aplicó el coeficiente de Spearman, y se obtuvo una correlación fuerte ($\rho = 0,627$). La hipótesis nula (H_0 : no existe correlación significativa) fue rechazada ($p = 0,000 < 0,05$), lo cual confirma una asociación significativa entre las variables y respalda el uso del coeficiente C como predictor de CN.

TABLA 6. VALORES DE C Y CN CALCULADOS PARA LAS 41 CUENCAS

#	Código	C	CN-II	#	Código	C	CN-II	#	Código	C	CN-II
1	53077010	0,50	66,75	15	26017070	0,42	68,13	29	52017130	0,47	66,90
2	44017140	0,40	52,00	16	26027240	0,38	57,64	30	26027210	0,47	67,94
3	26047020	0,49	66,92	17	53077060	0,49	69,24	31	52027030	0,50	66,91
4	52017070	0,51	73,07	18	26017080	0,43	68,56	32	21057030	0,47	66,43
5	26017110	0,43	63,63	19	44017060	0,29	45,10	33	26037010	0,47	64,21
6	26027250	0,44	60,60	20	52027020	0,51	67,73	34	21057130	0,48	60,32
7	26027090	0,45	66,87	21	26017060	0,42	67,85	35	44017050	0,33	42,86

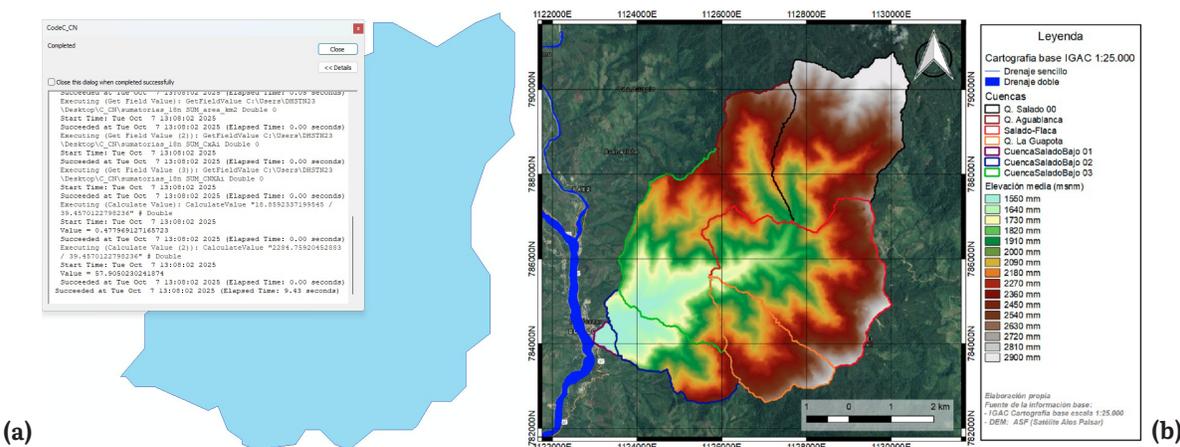
Continúa...

8	44017090	0,33	47,22	22	26027200	0,43	60,17	36	21057120	0,42	71,10
9	57027010	0,50	62,50	23	52017110	0,50	69,91	37	53047010	0,37	49,74
10	52027010	0,50	68,57	24	26017040	0,46	59,68	38	44017070	0,38	54,22
11	53077020	0,47	64,15	25	26027100	0,46	66,60	39	26057040	0,49	63,08
12	52017120	0,50	71,10	26	26037030	0,35	53,00	40	26027080	0,48	67,86
13	26017020	0,44	63,62	27	52017080	0,49	67,22	41	21057110	0,46	66,19
14	52017030	0,48	69,61	28	52017100	0,44	65,49				

Fuente: elaboración propia.

Para validar la herramienta C_CN_Calculator, se empleó sobre la cuenca de la quebrada El Salado, objeto de estudio por parte de la Gobernación del Cauca, en la municipalidad de Páez [21], y caracterizada mediante vuelos de radar. La captura se efectuó mediante el sensor óptico activo ALTM GEMINI, montado en una aeronave CESSNA 182, el cual opera en el rango del espectro electromagnético correspondiente a la luz láser (teledetección activa). Esta tecnología permite obtener información tridimensional precisa (coordenadas x, y, z) a partir del tiempo de retorno de los pulsos láser, lo cual fue utilizado para generar Modelos Digitales de Terreno (MDT) y nubes de puntos clasificadas por tipo de superficie [22].

El valor de CN obtenido por radar fue 67,22, mientras que el estimado por la herramienta fue 57,91, representando una aproximación del 84 % (figura 5), valor adecuado y aceptable considerando la escala regional del análisis.



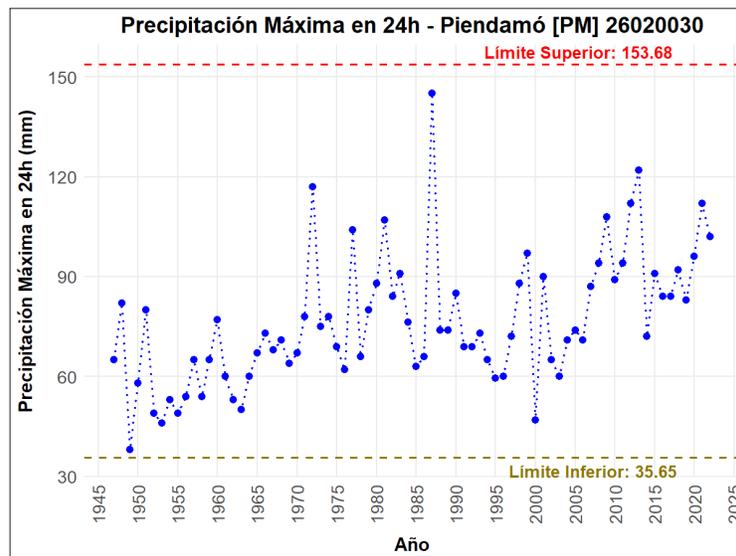
Fuente: elaboración propia adaptando informe Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo de la Alcaldía Municipal de Páez [21].

FIGURA 5.A. C_CN_CALCULATOR CUENCA DE VALIDACIÓN

FIGURA 5.B. CARACTERIZACIÓN VUELOS DE RADAR CUENCA PATRÓN

La cobertura espacial alcanzada permitió una caracterización detallada del centro y sur del departamento del Cauca, con énfasis en la región del Macizo Colombiano, donde se logró una clasificación del 100 %. Esta zona, considerada la principal estrella fluvial del país, representa un área estratégica para la gestión del recurso hídrico, al albergar el nacimiento de importantes cuencas hidrográficas como el Magdalena, Cauca y Amazonas. En contraste, municipios del litoral pacífico como Guapi y Timbiquí presentaron vacíos significativos, debido a limitaciones en el acceso, escasa densidad de estaciones y menor disponibilidad de información. Aunque se evidencian avances parciales en municipios como López de Micay, estas zonas siguen representando un reto técnico. Además, el norte del departamento, colindante con el Valle del Cauca, mostró una tendencia hacia la nula clasificación. Esta región, con alta proyección de desarrollo urbano e industrial, exige mayor atención para su caracterización hidrológica. En todos estos contextos, el uso de herramientas de teledetección y la ampliación de redes de monitoreo resultan fundamentales para cerrar brechas y avanzar hacia una gestión hídrica más equitativa y territorialmente integrada.

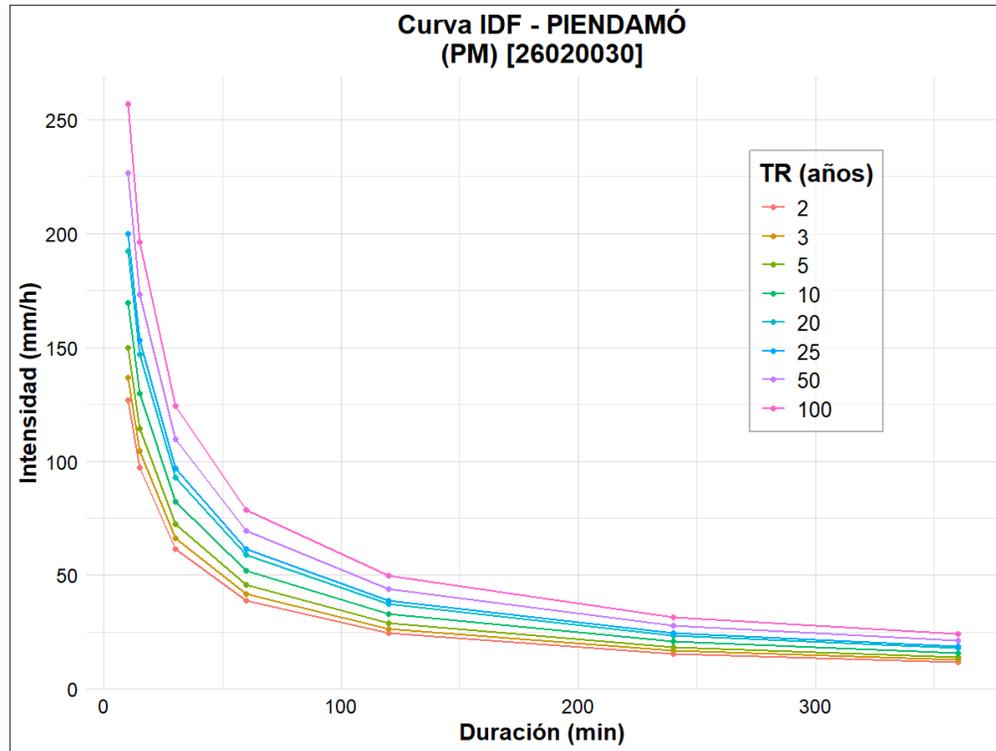
En relación con las curvas IDF, se recopilieron y procesaron datos de 86 estaciones pluviométricas. A pesar del acceso relativamente sencillo, se detectaron inconsistencias, especialmente en estaciones del Pacífico, lo cual requirió validación adicional con el IDEAM. Las series graficadas frente a sus valores extremos facilitaron la detección de “outliers” (figura 6), mejorando la precisión estadística. No todos fueron eliminados, pues algunos representaban eventos extremos reales, relevantes para diseño y evaluación de riesgo [23].



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas de R.

FIGURA 6. PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS VS. LÍMITES ESTACIÓN #48 PIENDAMÓ

Tras validar los datos, se estimó la precipitación máxima promedio en 24 horas, insumo base para generar 86 curvas IDF, considerando períodos de retorno de 2 a 100 años y duraciones de 10 a 360 minutos (figura 7), según normativa vigente [17].



Fuente: elaboración propia utilizando herramientas de R.

FIGURA 7. CURVAS IDF PARA ESTACIÓN #48 PIENDAMÓ

Las series fueron ajustadas a distribuciones estadísticas comunes en hidrología: Normal, Lognormal, Gamma, Log-Pearson, Gumbel Máx, entre otras [6], [24]. La prueba de Kolmogorov-Smirnov fue empleada para seleccionar la distribución más adecuada, valorada por su carácter no paramétrico y su flexibilidad para distintos tamaños de muestra [25].

TABLA 7. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE ORGANIZADAS
PARA LA ESTACIÓN #48 PIENDAMÓ

Clasificación según K-S	Distribución	Estadístico
1	Lognormal	0,05283
2	Lognormal (3P)	0,05298
3	Gamma (3P)	0,05429
4	Log-Pearson 3	0,05434
5	Gumbel Max	0,05687
6	Log-Gamma	0,05745
7	Gamma	0,06687
8	Normal	0,10049

Fuente: elaboración propia.

La distribución con mejor ajuste en la estación #48 Piendamó fue la Lognormal, utilizada para estimar precipitaciones asociadas a diferentes periodos de retorno (tabla 8), luego de evaluarse las pruebas de bondad de ajuste (tabla 7).

TABLA 8. CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA DIFERENTES
PERIODOS DE RETORNO PARA LA ESTACIÓN #48 PIENDAMÓ

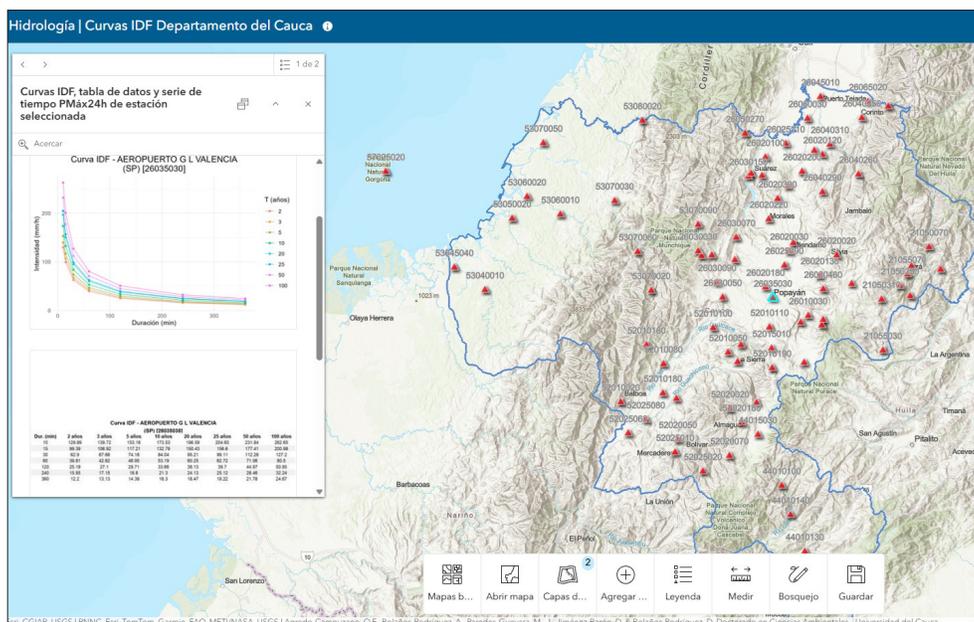
Tr	% excedencia	% no excedencia	P Máx 24h (Lognormal)
2	0,5	0,5	74,009
25	0,040	0,96	114,5
50	0,020	0,98	123,49
100	0,010	0,99	132,17
200	0,005	0,995	140,65
500	0,002	0,998	151,66

Fuente: elaboración propia.

En este artículo se detalla el procedimiento aplicado a una estación con datos de precipitación como ejemplo representativo, aunque la misma metodología fue implementada en las 86 estaciones del departamento, cuyos resultados se presentan de forma conjunta.

Finalmente, los resultados se integraron en una plataforma de visualización web mediante ArcGIS Online, la cual permite consultar las curvas IDF y series de tiempo

generadas. Esta plataforma está disponible para los lectores en el siguiente enlace:
<https://dicam.maps.arcgis.com/apps/instant/atlas/index.html?appid=799bdb386fe34d24bcc399069fb707aa&webmap=1a69a15eb55447f5902a026f1930b4ed>



Fuente: elaboración propia utilizando la herramienta de Arcgis Online.

FIGURA 8. CONSULTA DE CURVA IDF PARA ESTACIÓN 26035030, AEROPUERTO GUILLERMO LEÓN VALENCIA

La integración de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadístico permitió desarrollar herramientas metodológicas replicables, accesibles y de bajo costo. La correlación C-CN y la elaboración de curvas IDF desde información incompleta o dispersa representan aportes innovadores con aplicación directa en entornos con limitaciones técnicas. Esta combinación de enfoques fortalece las capacidades locales para reducir la incertidumbre en el diseño hidráulico, optimizar la planificación territorial y mejorar la resiliencia frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

A futuro, se propone fortalecer el modelo mediante la calibración de los coeficientes con registros de caudales y precipitaciones observadas. Aunque las metodologías empleadas son semicuantitativas, su simplicidad y bajo requerimiento de datos las hacen especialmente útiles para estudios regionales [26]. Incorporar variables dinámicas, como los cambios en el uso del suelo o los escenarios climáticos proyectados, podría ampliar la aplicabilidad del enfoque hacia una gestión más adaptativa y de largo plazo, alineada con políticas de sostenibilidad y riesgo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio permitió establecer una correlación lineal significativa entre el coeficiente de escorrentía (C) y el número de curva (CN-II), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,708$. La herramienta desarrollada, *C_CN_Calculator*, fue aplicada exitosamente en 41 cuencas del Cauca, mostrando su potencial como metodología replicable. Su validación con datos obtenidos mediante vuelos de radar en la cuenca de la quebrada El Salado arrojó una coincidencia del 84 %, lo cual refuerza su utilidad en contextos regionales.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la alta proporción de suelos tipo C (más del 50 % del área estudiada), asociados a escorrentía moderadamente alta en paisajes de uso mixto agrícola y natural. Este patrón sugiere la necesidad urgente de integrar criterios hidrológicos en la planificación territorial y de promover estrategias de conservación del suelo que mitiguen la degradación de cuencas.

La generación de curvas IDF, basada en 86 estaciones con series de más de 15 años, constituye un insumo técnico clave para el diseño hidráulico y la gestión del riesgo. No obstante, se identificaron inconsistencias en varias estaciones del litoral pacífico, lo que refuerza la necesidad de migrar hacia redes de monitoreo más robustas, incluyendo estaciones con capacidad de transmisión en tiempo real (telemetría).

Los productos generados (en particular la plataforma de acceso libre desarrollada en ArcGIS Online) representan un avance importante para facilitar la toma de decisiones informadas en el diseño de infraestructura, la gestión de cuencas y la adaptación al cambio climático. Desde una perspectiva de transferencia de conocimiento, se espera que esta herramienta sea útil no solo para profesionales y entidades gubernamentales, sino también para comunidades locales interesadas en comprender mejor los riesgos asociados a eventos extremos.

A futuro, se recomienda profundizar en la calibración de los coeficientes C y CN mediante registros de caudales y precipitaciones observadas, e incorporar variables dinámicas como el cambio en el uso del suelo y escenarios climáticos proyectados. Estas mejoras permitirán escalar la aplicabilidad del enfoque hacia una gestión hidrológica más adaptativa, en coherencia con los principios de sostenibilidad, equidad territorial y reducción del riesgo de desastres.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología (GIHH) y al Semillero de Investigación HidroInnovación (SHI), cuya colaboración fue esencial para este trabajo. Al profesional William González (IDEAM), por el suministro de

información hidrometeorológica. A la Especialización en Ingeniería de Recursos Hídricos y al Doctorado en Ciencias Ambientales, ambos programas de la Universidad del Cauca por el suministro de licencias de ArcGIS.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Agredo-Campuzano, O. F.: conceptualización, preparación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyectos, recursos, *software*, supervisión, validación, visualización, redacción del borrador original, redacción - revisión y edición. Jiménez-Barón, D. L.: preparación de datos, análisis formal, investigación, *software*, validación, visualización, redacción del borrador original. Bolaños-Rodríguez, A. M.: análisis formal, obtención de fondos, investigación, supervisión, redacción - revisión y edición. Paredes-Guevara, M. J.: análisis formal, obtención de fondos, investigación, supervisión, redacción - revisión y edición.

Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés relacionado con la publicación de este artículo.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio pueden obtenerse del autor correspondiente [Agredo-Campuzano, O. F.], previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- [1] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Applied Hydrology*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1988.
- [2] R. Vargas y M. Díaz-Granados, “Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia”, tesis de maestría, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 1998.
- [3] L. D. Donado, S. A. Romero-Duque y D. A. Cortes-Ramos, “Regionalización de Caudales a partir de la Caracterización Morfoclimática de Cuencas. Caso de Estudio: Valle Medio de Magdalena - Colombia” (ponencia), en XXIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, 2021. Disponible en: <https://sci.org.co/memorias-xxiv-seminario-nacional-de-hidraulica-e-hidrologia/>. [Accedido marzo 2024].

- [4] J. R. Témez, “Generalización y mejora del método racional”, Ingeniería Civil, vol. 82, pp. 51-56, 1991.
- [5] M. Ajmal, M. Waseem, M. Jehanzaib y T.-W. Kim, “Development and testing of updated curve number models for efficient runoff estimation in steep-slope watersheds”, Journal of Hydrology, vol. 617, p. 129049, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129049>.
- [6] F. Aparicio, Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa, 1997.
- [7] A. A. Méndez, “Transición energética en Colombia: Propuestas para promoverla a partir del potencial de las energías renovables y su nivel de implementación actual en el país” [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/54075>.
- [8] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Diccionario Geográfico Gobernación del Departamento del Cauca”, 28 de agosto de 2023 [En línea]. Disponible en: <https://diccionario.igac.gov.co/>.
- [9] University of Alaska Fairbanks, Alaska Satellite Facility, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.
- [10] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Mapas Cobertura Tierra. Obtenido de Cobertura de la tierra periodo 2010 - 2012. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>.
- [11] U.S. Geological Survey (USGS), “Earth Explorer”, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- [12] IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “Mapas de suelos del territorio colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cauca”, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>.
- [13] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), “Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos”, 2023 [En línea]. Disponible en: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.
- [14] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”. R Foundation for Statistical Computing, 2024 [En línea]. Disponible en: <https://www.R-project.org>.
- [15] Water Resources Council (actualmente United States Geological Survey), “Guidelines for determining flood flow frequency”, bulletin 17B, Reston, Virginia, 1981 [En línea]. Disponible en: https://water.usgs.gov/osw/bulletin17b/dl_flow.pdf.
- [16] M. Polanco, Principios básicos de mecánica de suelos. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2009.

- [17] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), “Manual de drenaje para carreteras”, 2009 [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>.
- [18] G. Monsalve S., Hidrología en la Ingeniería, 2ª ed. Bogotá, D.C., Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
- [19] ASCE/EWRI Curve Number Hydrology Task Committee, R. H. Hawkins, and Environmental and Water Resources Institute (US), Curve number hydrology: state of the practice, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009 [En línea]. Disponible en: <https://search.worldcat.org/es/title/curve-number-hydrology-state-of-the-practice/oclc/698590607>.
- [20] E. Aristizábal, M. I. Arango Carmona e I. K. García López, “Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos”, Revista Colombiana de Geografía, vol. 29, n.º. 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>.
- [21] Alcaldía Municipal de Páez - Cauca, Documentos importantes, Gestión del Riesgo, 31-Oct-2020 [En línea]. Disponible en: <http://www.paez-cauca.gov.co/documentos-importantes/estudios-de-amenaza-vulnerabilidad-y-riesgos-por-movimientos>.
- [22] Servicio Geológico Colombiano, “Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales”, 2021 [En línea]. Disponible en: <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/75>.
- [23] Z. W. Kundzewicz y A. J. Robson, “Change detection in hydrological records –a review of the methodology”, Hydrological Sciences Journal, vol. 49, n.º. 1, pp. 7-19, 2004. doi: <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>.
- [24] A. Avilés, A. Solera y J. Paredes, «Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo», pp. 48-57, 2016. doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n15.2016.05>.
- [25] F. J. Massey, “The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit”, Journal of the American Statistical Association, vol. 46, n.º. 253, pp. 68-78, 1951 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/2280095>.
- [26] A. D. Díaz Carvajal y T. Mercado Fernández, “Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG”, Ing. y Des., vol. 35, n.º. 2, pp. 452-470, julio 2017. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>.