

XXXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MEDELLÍN-COLOMBIA OCTUBRE 01-04 2024

ACTUALIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA CALCULADORA DE CURVAS IDF PARA COLOMBIA

Alexander VILLAMIZAR¹ y Erasmo Alfredo RODRÍGUEZ²

^{1,2} Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Universidad Nacional de Colombia,
Colombia

avillamizarh@unal.edu.co, earodriguezs@unal.edu.co

RESUMEN

El diseño hidrológico en Colombia enfrenta el desafío de estimar caudales en cuencas no instrumentadas debido a la limitada disponibilidad de estaciones hidrométricas. Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) son cruciales para este diseño. Tradicionalmente, las curvas IDF se construyen con base en registros pluviográficos, pero la carencia de estos datos impulsa el uso de metodologías sintéticas. En respuesta, el proyecto de actualización de curvas IDF para Colombia desarrolló la calculadora de curvas IDF generalizadas (Cal IDF-G), una herramienta en RStudio, que estima intensidades máximas de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno. La versión original de Cal IDF-G incluía cuatro métodos de estimación. Las mejoras recientes, detalladas en este artículo, incorporan la metodología de Díaz-Granados & Puente y actualizan las curvas IDF para 26 nuevas estaciones en la región Caribe, ampliando la base de datos con registros de estaciones pluviográficas actualizadas hasta 2010. La herramienta ahora permite sugerir duraciones típicas de tormentas y ha optimizado su código para mejorar su eficiencia. Las actualizaciones también incluyen la validación y comparación de metodologías en el Caribe colombiano, con énfasis en la precisión y la reducción de errores en las estimaciones. Además, se han realizado mejoras en la visualización y el acceso a través de la plataforma en la nube, facilitando su uso para la comunidad académica e ingenieril. Las principales limitaciones de la herramienta incluyen la cobertura parcial de estaciones y la necesidad de mejorar la robustez de los métodos empleados, como por ejemplo el cálculo de envolventes. Sin embargo, la herramienta sigue siendo útil para el diseño hidrológico, complementando el análisis con un enfoque crítico en zonas con información limitada. La optimización del código ha reducido tiempos de carga, y se planifican futuras mejoras para incorporar nuevas metodologías y mejorar la precisión en la estimación de curvas IDF sintéticas en la región Andina.

1. Introducción

El diseño hidrológico en Colombia, al igual que en otros países de Latinoamérica, es crucial para determinar el caudal de diversas estructuras hidráulicas, pero enfrenta un desafío significativo. Este proceso se realiza principalmente en cuencas no instrumentadas, utilizando modelos lluvia-escorrentía sencillos, como el método racional o el método del hidrograma unitario. Esta práctica se debe a la escasez de estaciones hidrológicas en ríos y quebradas, lo que impide realizar estimaciones directas mediante análisis estadísticos, como el análisis de frecuencias. Un componente fundamental en el diseño hidrológico son las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), que condensan la información de lluvias extremas en una estación pluviográfica específica. Tradicionalmente estas curvas se construyen a partir de registros pluviográficos y del análisis de pluviogramas. Sin embargo, tanto en Colombia como en otros países latinoamericanos, la falta de información de este tipo es un problema común. En este contexto, resulta necesario implementar metodologías sintéticas o generalizadas para la estimación de las curvas IDF, utilizando como base principal los registros de estaciones pluviométricas (más numerosas que las pluviográficas) y datos de otras variables fisiográficas. En respuesta a esta necesidad

y, en el marco del proyecto de actualización de curvas IDF para Colombia (IDEAM-UNAL, 2016), se desarrolló una calculadora de curvas IDF generalizadas (Villamizar et al., 2018), que ha sido continuamente actualizada y optimizada. Este artículo se enfoca en describir las mejoras recientes realizadas en la calculadora, desde la incorporación de nuevos métodos generalizados para la estimación de curvas IDF, hasta la adición de nuevas curvas IDF, actualizadas como las originales hasta el año 2010, especialmente para estaciones pluviográficas cuyos pluviogramas han sido escaneados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

2. Metodología

La calculadora de curvas IDF generalizadas para Colombia, denominada Cal IDF-G, fue desarrollada en RStudio, como una herramienta eficaz y con gran potencial para la estimación de la intensidad de la lluvia en zonas no instrumentadas. Esta herramienta permite estimar intensidades máximas para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, con duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos.

La versión original de la calculadora incorporaba cuatro métodos específicos para la estimación de curvas IDF generalizadas en Colombia: el de Chen (1983), el de Vargas & Díaz-Granados (1998), el de Escalamiento de la Precipitación (Pulgarín & Poveda, 2008) y el del Proceso Máximo Estable (Smith & Stephenson, 2009), este último únicamente para la zona Andina. En el marco del trabajo de Villamizar y Rodríguez (2022), se añadió a la calculadora una nueva metodología: la de Díaz-Granados & Puente (2008).

Aprovechando los resultados de las investigaciones de Torres et al. (2021) y Torres et al. (2024), se incorporaron a la calculadora las curvas IDF de 26 nuevas estaciones en la región Caribe. Este proceso se basó en la información de 10 estaciones pluviográficas actualizadas en 2021 y 16 estaciones actualizadas en el 2023, las cuales se añadieron a la base de datos de la calculadora (ver Figura 1). Esta ampliación de información facilita comparaciones con las curvas IDF sintéticas generadas por cualquiera de los métodos disponibles, en el punto seleccionado por el usuario.

Además de permitir el cálculo de las curvas IDF mediante los cinco métodos mencionados, Cal IDF-G ahora sugiere la duración mediana de las tormentas típicas en la zona de estudio ayudando al usuario a considerar esta información en la estimación de tormentas de diseño. Estas duraciones típicas de tormentas se obtuvieron para 70 estaciones, según lo reportado en el estudio de Rodríguez y Ávila (2022).

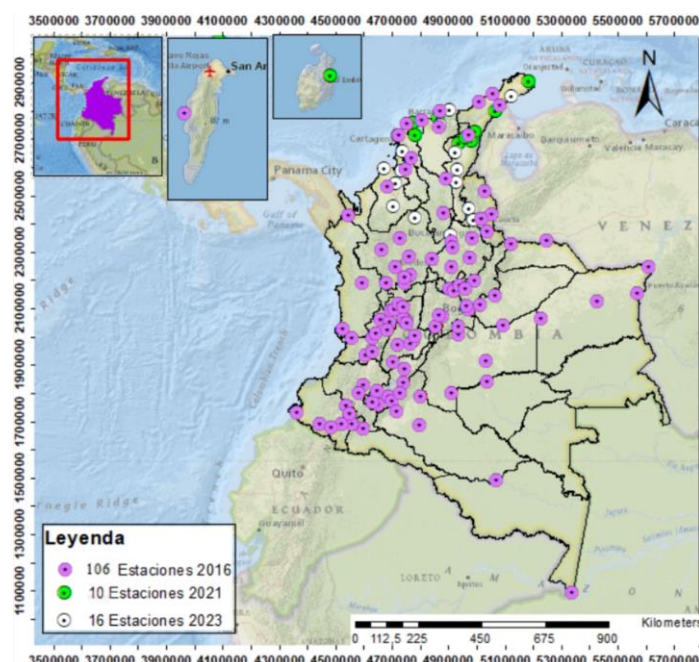


Figura 1. Mapa de localización de las estaciones pluviográficas con curvas IDF actualizadas en 2016 (106), 2021 (10) y 2023 (16).

3. Revisión cronológica de aportes a Cal IDF-G

La Figura 2 presenta una línea de tiempo que resume el origen y los desarrollos adicionales incorporados a Cal IDF-G. A continuación se destacan los resultados más importantes y se realiza una revisión bibliográfica de los artículos que sustentan la actualización de la calculadora.

3.1. Concepción y desarrollo de la Calculadora Curvas IDF generalizadas

La idea de desarrollar una calculadora para obtener las curvas IDF sintéticas en cualquier parte del territorio colombiano surgió a partir de los resultados obtenidos en el proyecto de actualización de curvas IDF para Colombia, llevado a cabo por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) para el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El documento de IDEAM-UNAL (2016) describe la actualización al año 2010, de las curvas IDF para 106 estaciones pluviográficas, lo que representa aproximadamente el 25% del total de estaciones pluviográficas operadas por el IDEAM en todo el país. Estas estaciones están distribuidas geográficamente de la siguiente manera: 66% en la región Andina, 13% en la región Caribe, 12% en la Orinoquia, 6% en la región Pacífico y 3% en la Amazonia. La actualización de las curvas IDF se realizó a través de un proceso riguroso, que luego se replicó para otras curvas. El proceso comenzó con la revisión y organización de las cartas pluviográficas previamente escaneadas, identificando los 15 eventos de tormenta más relevantes con sus respectivas fechas, para cada estación y para cada año. Se exigió que los datos pluviográficos tuvieran una serie histórica de al menos 10 años. Posteriormente, se digitalizaron de forma semi-automática cerca de 16,000 cartas seleccionadas utilizando la Herramienta para el cálculo de curvas IDF desarrollada en la Universidad Nacional (HIDFUN) (Fuentes et al., 2018). Este proceso permitió obtener curvas de masa para cada carta, a partir de las cuales se calcularon las intensidades máximas en (mm/hr) para períodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, y para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 360 minutos. Durante el proceso, se analizaron las inconsistencias y posibles anomalías en las series anuales de intensidades máximas así obtenidas, asegurando la calidad y consistencia de los datos, lo que llevó al descarte de 23 cartas. Además, se realizó un análisis de homogeneidad entre las series de HIDFUN y las existentes del IDEAM, utilizando la prueba ANOVA para las medias y la prueba de Levene para las varianzas. Los resultados indicaron que las no homogeneidades eran más significativas en la media y en las duraciones más cortas (5 y 10 min). Asimismo, se desarrolló e implementó una herramienta en lenguaje R, denominada Análisis de Frecuencias UNAL (AdFUNAL), que incluye el paquete estadístico “IDFtool” (Zamora et al., 2016 & UNAL, 2016). Esta herramienta permite reconstruir las curvas IDF existentes y ajustar las curvas actualizadas mediante la distribución de Gumbel, utilizando el método de L-momentos. Finalmente, se exploraron diversas metodologías para obtener las curvas IDF sintéticas en sitios sin información pluviográfica, aplicando cuatro métodos: i) método de Chen (1983), ii) método de Vargas & Díaz-Granados (1998), iii) método de escalamiento de la precipitación (Pulgarín & Poveda, 2008), y iv) la técnica del proceso máximo estable (Smith & Stephenson, 2009), éste último aplicable solo para la región Andina. La estimación de las curvas IDF utilizando estas metodologías, se basó en la información mencionada de las 106 estaciones analizadas. Los resultados obtenidos se consolidaron en el desarrollo de la calculadora de curvas IDF generalizadas, en la plataforma RStudio.

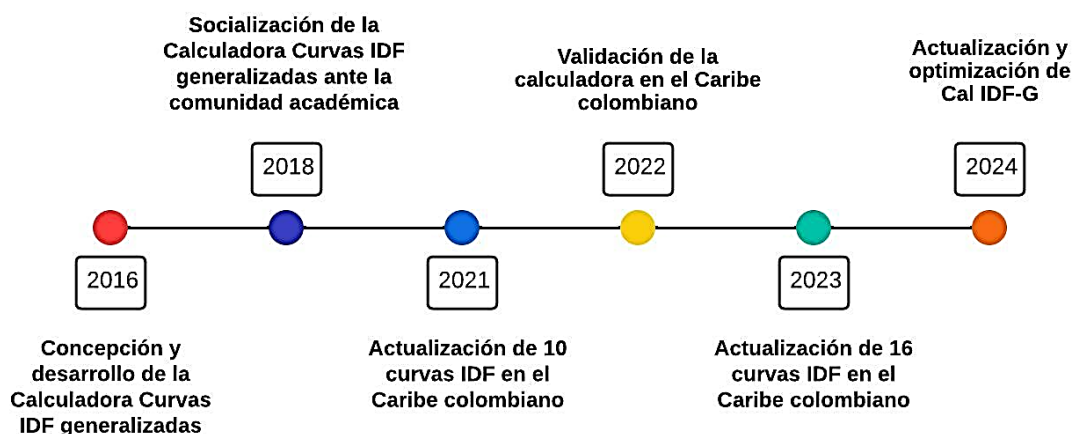


Figura. 2. Línea del tiempo con el desarrollo y mejoras de la Cal IDF-G.

3.2. Socialización de la Calculadora Curvas IDF generalizadas ante la comunidad académica

En el XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología de 2018, se presentó el artículo “Desarrollo de una Calculadora de Curvas IDF Generalizadas para Colombia” (Villamizar et al., 2018). En este documento se detallaron las metodologías utilizadas por la calculadora que incluyen el método de Chen, Vargas y Díaz-Granados, Escalamiento de la precipitación y Proceso Máximo Estable, que utiliza la calculadora, junto con la adaptación de parámetros para el ámbito colombiano. Se destacó también el uso de las librerías de RStudio necesarias para ejecutar el código desarrollado, destacando las siguientes: Shiny, leaflet, ggmap, dplyr, rgdal,

sp, raster, png, xlsx, plotly, SpatialExtremes y minpack.lm, cuya descripción se puede ampliar en el artículo mencionado. La ejecución del código se realizaba como una única función: “runApp(fun.Cal.CIDF.G())”, indicando que el script estaba estructurado como una sola función que incorpora múltiples funciones. El artículo incluyó un ejemplo específico de aplicación de la calculadora para obtener una curva IDF y analizó los resultados de las comparaciones entre las curvas IDF generalizadas estimadas mediante las cuatro metodologías y las obtenidas de forma tradicional, actualizadas y ajustadas a la distribución Gumbel con el método de L-momentos (Tabla 1). El estudio concluyó que los errores promedio varían entre 15 y 25%, y que aunque las cuatro metodologías demostraron un buen potencial de aplicación en sitios sin información pluviográfica, presentan incertidumbres significativas que deben ser consideradas.

Tabla 1. Comparaciones entre las curvas IDF obtenidas para cada metodología y las curvas IDF obtenidas de forma tradicional.

Metodología	Resultados
Chen	• Las diferencias porcentuales son menores al 10% comparadas con las curvas IDF actualizadas • Se evidencia que se presentan diferencias porcentuales mayores al 30% para duraciones de 15 min y 360 min, en periodos de retornos grandes. • Para la mayoría de los casos (más del 75%), los errores porcentuales son de hasta 15%. • Entre 63-76% de los valores presentan errores de hasta 5%. • Este método presenta los mejores resultados para regiones diferentes a la Andina.
Vargas y Díaz-Granados	• Presenta errores máximos porcentuales del 30%. • Los errores promedio se encuentran entre 15-25%, dependiendo de la región. • Este método presenta resultados favorables para regiones diferentes a la Andina, después del método de Chen.
Escalamiento	• Errores relativos promedio de aproximadamente 17%. • Los errores del orden del 30% se presentan en pocos casos. • Solo una estación presentó un error promedio del orden del 110%.
Proceso máximo estable	• Los errores promedio están por debajo del 30%. • Al incluir variables pluviométricas, los errores se reducen a menos del 20%. • Solo es aplicable en la región Andina. • Presenta los mejores resultados con un menor error porcentual promedio (aproximadamente 4%) de todos los métodos utilizados para la región Andina.

Cabe resaltar que en ese momento, la calculadora incluía: i) líneas de envolvente y mediana, basadas en las cuatro metodologías, ii) curvas IDF obtenidas de forma tradicional, derivadas del estudio IDEAM-UNAL (2016), así como las curvas IDF de información secundaria, provenientes de reportes de consultoría y de entidades como EPM y EAAB, entre otras.

3.3. Actualización de diez curvas IDF en el Caribe colombiano

En el XXIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología del 2021, se presentó el artículo “Un aporte a la caracterización de lluvias extremas en el Caribe Colombiano a través de la construcción de curvas intensidad-duración- frecuencia” (Torres et al., 2021). Este trabajo actualizó diez curvas IDF en el Caribe colombiano utilizando registros del IDEAM entre los años 1964 y 2012. La metodología para obtener las curvas IDF es idéntica a la descrita en el apartado 3.1, aunque en este caso solo se estimaron las intensidades máximas para las duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos. Además, se realizó una interpolación de las intensidades máximas con IDW, para las cinco duraciones de cada periodo de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años) espacializándolas en la región Caribe considerando la información de las 14 estaciones previamente actualizadas en el trabajo de IDEAM-UNAL (2016) para la misma zona. La calidad de la interpolación se evaluó mediante el método de validación cruzada, estimando el error de predicción con la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Se concluyó que al integrar las nuevas curvas IDF (de 10 estaciones) con las actualizadas en el estudio anterior (14 estaciones antiguas), se puede reducir el error de predicción en comparación con las interpolaciones realizadas solamente con las estaciones antiguas. Sin embargo, se debe tener precaución, ya que factores como la altitud, la subzona hidrográfica de la estación y la climatología local, pueden provocar variaciones en la intensidad de precipitación en estaciones cercanas.

3.4. Validación de la calculadora en el Caribe colombiano

En el XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica de 2022, el artículo “Validación de la Calculadora de Curvas Sintéticas IDF en el Caribe colombiano” (Villamizar & Rodríguez, 2022), se presentaron dos aportes significativos a la calculadora: i) la incorporación de la metodología de Díaz-Granados & Puente (2008), con una explicación detallada de las ecuaciones y su adaptación en la herramienta y ii) un análisis de la validación de las curvas IDF generalizadas en sectores de la región Caribe colombiana para cuatro métodos utilizados en

la calculadora (Chen, Vargas y Díaz-Granados, Escalamiento y Díaz-Granados & Puente). Este análisis se realizó mediante la comparación de las intensidades máximas de nueve curvas IDF construidas de forma tradicional, empleando dos métricas de desempeño: error cuadrático medio (RMSE) estandarizado y BIAS. Los resultados se agruparon en dos categorías: i) intensidades menores o iguales a una hora (15, 30 y 60 min) y ii) intensidades mayores a una hora (120 y 360 min). El estudio reveló que las metodologías mencionadas tienden a subestimar las intensidades máximas reales para las estaciones del Caribe. Según las métricas, los coeficientes de variación (Cv), los diagramas de violín para RMSE y el análisis de envolventes, las metodologías de Chen y Vargas y Díaz-Granados ofrecen los mejores resultados. Específicamente para el método de Chen, el 66.7 % de las estaciones presentan resultados entre muy buenos y buenos para duraciones menores o iguales a una hora con un Cv de 51.5% y 77.8% para duraciones mayores de una hora con un Cv de 79.8%. En el caso de Vargas y Díaz-Granados, el 88.9% de las estaciones muestran resultados buenos para duraciones mayores de una hora con un Cv de 50.0%, pero para duraciones menores de una hora solo el 11.1% entre buenos y muy buenos con un Cv de 46.4%. Las metodologías de Escalamiento y Díaz-Granados & Puente, también muestran resultados entre buenos y muy buenos para duraciones menores o iguales a una hora, superando a Vargas y Díaz-Granados, aunque con un Cv mayor (58.7% y 74.3%, respectivamente). La metodología de Chen presenta una alta dispersión para duraciones mayores de una hora. En conclusión, el estudio indica que aunque la metodología de Chen proporciona los mejores resultados generales para la región Caribe, su alta dispersión sugiere la necesidad de explorar otras alternativas para estimar la envolvente de la intensidad máxima, especialmente para duraciones menores o iguales a una hora.

3.5. Actualización de dieciséis curvas IDF en el Caribe colombiano

En el XXV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología de 2024, se presentó el estudio “Aporte al Diseño Hidrológico en el Caribe colombiano a través de nuevas Curvas IDF” (Torres et al., 2024), que documenta la construcción de 16 nuevas curvas IDF para la región Caribe de Colombia. El proceso metodológico utilizado para esta actualización es similar al descrito en los apartados 3.1 y 3.3. Adicionalmente, el estudio incluye un análisis de la variación espacio-temporal de las intensidades, comparando las nuevas intensidades y las existentes en la región y la validación cruzada para tres escenarios (i) utilizando únicamente las 14 estaciones con curva IDF construida por el IDEAM (UNAL, 2016), ii) incorporando 10 estaciones adicionales construidas en la primera etapa del proyecto (Torres et al., 2021) y iii) añadiendo las 16 nuevas curvas IDF. Se estimó el error de predicción en la interpolación IDW, usando el error cuadrático medio (RMSE). En el estudio se observó que el error en la predicción de la interpolación aumenta al incluir más estaciones en el análisis. Esto se debe a que en el escenario iii se abarcó una mayor área de estudio hacia la zona sur del Caribe, donde se captó una mayor variación de las intensidades por orografía, y los distintos regímenes climáticos de los diferentes departamentos. Además, se notó que las estaciones con mayores RMSE se encontraban en el borde del área interpolada, lo que se atribuye a la falta de información circundante para una predicción más precisa de las intensidades. En el estudio se evidenció que las estaciones con una mayor densidad de puntos cercanos presentaron mejores predicciones y con RMSE menores. En conclusión, la cantidad de estaciones utilizadas en el estudio fue insuficiente al ampliar el área de análisis interpolada. Es por ende necesario incorporar más estaciones para representar mejor la variabilidad del campo de intensidades en la región y reducir el error de predicción.

3.6. Actualización y optimización de la Cal IDF-G

Con base en los resultados de los estudios mencionados, se han implementado mejoras significativas en la calculadora Cal IDF-G. Las principales actualizaciones incluyen:

- 1) Incorporación de 10 estaciones nuevas en la región Caribe con curvas IDF actualizadas (descrita en la sección 3.3).
- 2) Adición de 16 estaciones nuevas en la región Caribe con curvas IDF actualizadas (descrita en la sección 3.5).
- 3) Inclusión de la metodología de Díaz-Granados & Puente, para un total de 5 metodologías (descrita en la sección 3.4).

Además, se ha integrado información adicional proveniente del estudio de Rodríguez & Ávila (2022), que incluye datos sobre la hora de inicio, hora final, duración típica, precipitación total y ciclo diurno de precipitación para 70 estaciones, con un período de análisis de 1990-2010. Esta información permite obtener al usuario el dato de la estación más cercana a la coordenada ingresada, lo cual es crucial para la planificación,

manejo e implementación de medidas ante la ocurrencia de estos eventos extremos, un aspecto fundamental en el diseño hidrológico y por tanto en las estructuras hidráulicas.

Se ha realizado también un cambio estructural al código de RStudio - Shiny para optimizar los procesos de cálculo y facilitar el acceso a la herramienta por parte de la comunidad académica e ingenieril. El código se organiza en cuatro partes: i) declaración de librerías y asignación de variables generales e insumos usados por los cinco métodos, ii) sección de “UI” o interfaz del usuario, que define cómo el usuario interactúa con la aplicación incluyendo elementos como botones, tablas, gráficas y opciones desplegables, iii) sección de “Server” que contiene el código lógico de la aplicación, procesando y calculando los datos y almacenando las selecciones del usuario, para mostrar los resultados en “UI” y iv) funciones que realizan procesos según las variables de entrada, que para este caso es la coordenada de interés (introducida de forma manual o ubicándola en el mapa) y posteriormente la elección del ingreso manual o automático de los parámetros de entrada como el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (M), el promedio del número de días con lluvia al año (N), la precipitación media anual (PT) y la elevación (ELEV), con el fin de estimar las curvas IDF para las metodologías de Vargas y Díaz-Granados, Proceso Máximo Estable y Díaz-Granados & Puente. Cal IDF-G tiene 17 funciones fundamentales para proyectar coordenadas, buscar las curvas IDF construidas de forma tradicional o proporcionadas por otras entidades (denominadas “curvas IDF secundarias”) y mostrar la más cercana a la coordenada ingresada, y las funciones para la estimación de las curvas IDF para cada una de las cinco metodologías, generando los insumos para la visualización de tablas y gráficas.

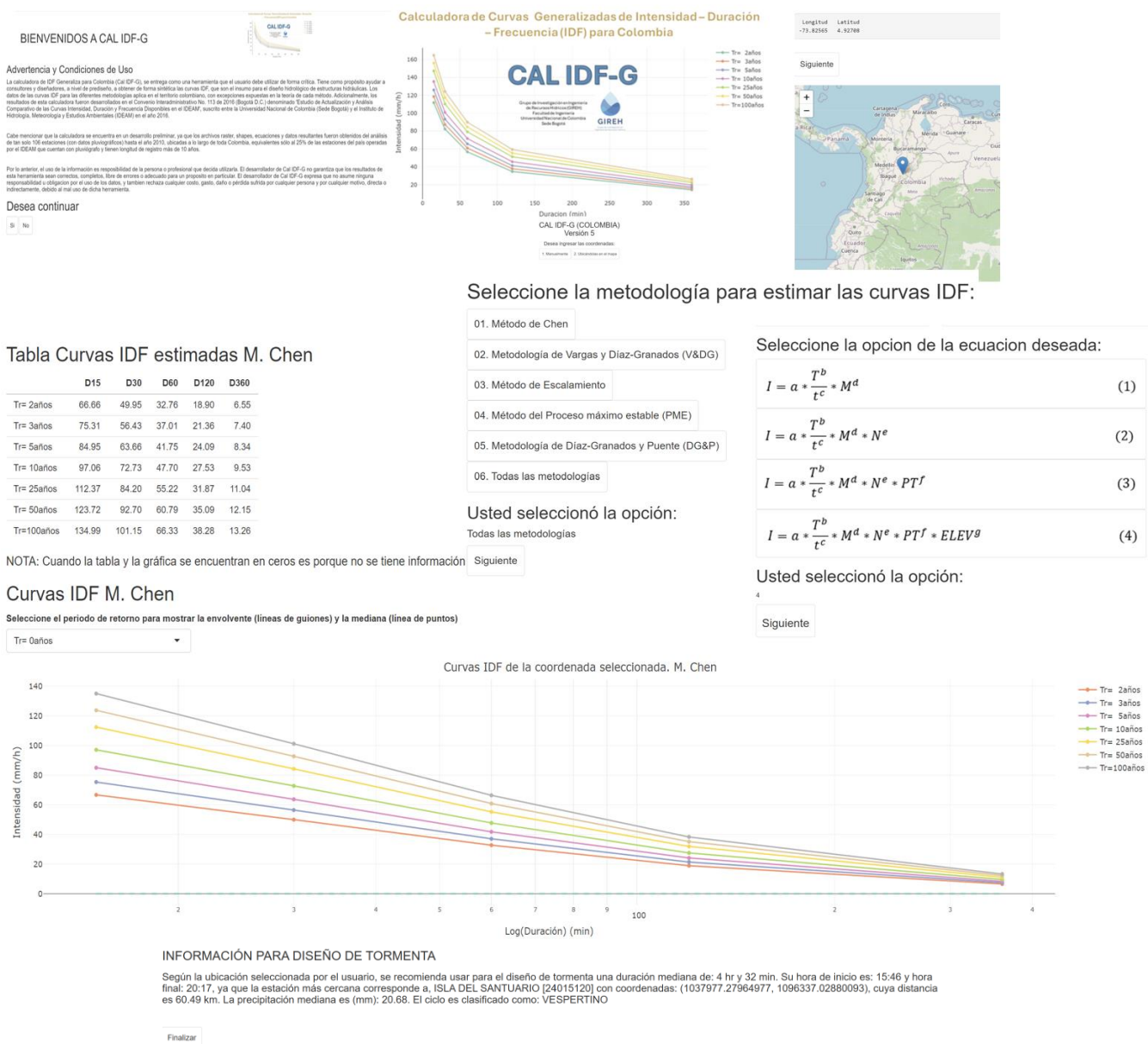


Figura. 3. Capturas de pantalla de la interfaz de la página web de Cal IDF-G.

Las modificaciones al código han mejorado la eficiencia de ejecución, reduciendo el tiempo de carga y visualización de resultados en la versión de escritorio. Además, se ha actualizado la visualización, incluyendo cambios en la presentación, los botones de selección, el logo y el nombre de la calculadora. Se ha sustituido la ejecución de la última línea del script “runApp(fun.Cal.CIDF.G())”, por “shinyApp(ui, server)”, facilitando su ejecución como aplicación. La herramienta ahora está disponible en la nube a través de la plataforma “shinyapp.io”, permitiendo a los usuarios acceder a la calculadora Cal IDF-G en la página web https://alexvillaher.shinyapps.io/cal_idf_g/ (Figura 3).

4. Ventajas y limitaciones de Cal IDF-G

Dentro de las ventajas de Cal IDF-G, se destaca que es una herramienta fácil de usar, que permite al usuario, ingresar coordenadas manualmente o mediante un clic en un mapa. Los usuarios pueden seleccionar entre cinco metodologías (Chen, Vargas & Díaz-Granados, Escalamiento, Proceso Máximo Estable y Díaz-Granados & Puente), para estimar las curvas IDF de forma sintética.

La calculadora también presenta i) los resultados en tablas y gráficos, mostrando la envolvente y la mediana para cada curva IDF de cada periodo de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años) y las cinco metodologías disponibles en cualquier lugar dentro del territorio colombiano, ii) proporciona información detallada en tablas y gráficos de las curvas IDF actualizadas por IDEAM-UNAL (2016), Torres et al. (2021) y Torres et al. (2024), mostrando la más cercana al punto suministrado por el usuario y iii) aporta información sobre la hora de inicio, hora final, duración típica, precipitación total y ciclo diurno de precipitación de las tormentas extremas (Rodríguez & Ávila, 2022), para la estación más cercana a la coordenada ingresada, facilitando el análisis inicial para la construcción de tormentas de diseño.

Una limitante importante es que los archivos de insumo (raster, shapes, ecuaciones y datos resultantes) de la calculadora para la estimación de las curvas que utilizan las diferentes metodologías fueron obtenidos del estudio de 106 estaciones pluviográficas (equivalentes al 25% de las estaciones pluviográficas del país operadas por el IDEAM), ubicadas a lo largo de toda Colombia. Esta cobertura puede limitar la precisión de la estimación.

Los métodos empleados para la estimación de las envolventes de las curvas IDF no son completamente robustos y requieren mejoras (Villamizar et al., 2018). Esto se evidenció en la validación efectuada en la región Caribe, donde algunas metodologías subestimaron las intensidades máximas reales.

Cada una de las cinco metodologías utilizadas en la calculadora, tiene sus propias limitaciones y ventajas. Por ejemplo la metodología del Proceso Máximo Estable solamente es aplicable a la región Andina y muestra los mejores resultados en esa zona. La metodología de Vargas & Díaz-Granados no es viable en la Amazonia, por la poca densidad de estaciones en dicha región (3 estaciones) y es la segunda metodología que proporciona resultados favorables, después del método de Chen, cuyo coeficiente de variación resultó ser grande en la región Caribe. Por lo tanto, se recomienda utilizar Cal IDF-G como herramienta de apoyo en el prediseño, complementado con un análisis crítico de los resultados obtenidos, especialmente en zonas con limitada información pluviográfica.

La versión web de Cal IDF-G puede experimentar demoras en la obtención de los resultados debido a la necesidad de procesar los cálculos en la nube. El tiempo de respuesta depende de la velocidad de conexión a internet del usuario. Además, la versión gratuita de “shinyapp.io” está limitada a 25 horas activas al mes, lo que puede restringir el acceso a la aplicación para algunos usuarios.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se listan y discuten a continuación las principales conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado. Estas conclusiones destacan los avances realizados en la herramienta y su impacto en el diseño hidrológico en Colombia, así como las áreas que aún requieren atención y mejora.

1. **Actualización y Mejora Continua:** La calculadora de curvas IDF generalizadas (Cal IDF-G) ha sido actualizada y optimizada con la incorporación de nuevas metodologías y datos, incluyendo las metodologías de Díaz-Granados & Puente y la actualización de estaciones en la región Caribe. Estas mejoras incrementan la precisión y la aplicabilidad de la herramienta en áreas no instrumentadas.

2. **Validación en la Región Caribe:** Las validaciones realizadas en el Caribe colombiano muestran que las metodologías de Chen y Vargas y Díaz-Granados ofrecen los mejores resultados en términos de precisión, aunque las metodologías tienden a subestimar las intensidades máximas reales para algunas estaciones. La metodología de Chen, a pesar de su alta dispersión, sigue siendo una de las más efectivas.
3. **Actualización de Datos Pluviográficos:** La inclusión de nuevas estaciones y datos actualizados de curvas IDF permite una mejor representación de las intensidades de precipitación en el Caribe colombiano. Las nuevas curvas IDF construidas muestran una mejora en la precisión de la estimación de intensidades, aunque la variabilidad espacial y temporal sigue siendo un desafío.
4. **Optimización de la Herramienta:** La optimización del código en RStudio ha mejorado significativamente la eficiencia de la calculadora, reduciendo el tiempo de carga en la visualización de resultados. Se espera que las mejoras en la interfaz de usuario y en la funcionalidad de la aplicación faciliten su uso por parte de la comunidad académica e ingenieril. En el futuro se planifican desarrollos adicionales para la calculadora, incluyendo mejoras en la estimación de envolventes, la incorporación de una nueva metodología para estimar curvas IDF sintéticas en la región Andina basada en datos ajustados del producto satelital IMERG (ver Sandoval et al. (2024), en este Congreso) y el cálculo de tormentas de diseño utilizando las duraciones típicas de tormenta junto con la curva IDF generalizada correspondiente.
5. **Limitaciones y Precauciones:** A pesar de los avances, la estimación de curvas IDF sintéticas sigue siendo un desafío, pues es sensible a factores como la variabilidad espacio-temporal de las tormentas extremas, la información disponible y los métodos utilizados. Se recomienda tener en cuenta estas limitaciones y considerar la incorporación de más estaciones y datos para futuras actualizaciones.
6. **Beneficios de la Cal IDF-G:** La calculadora Cal IDF-G es una herramienta valiosa, versátil y accesible para estimar curvas IDF en áreas sin información pluviográfica. Su capacidad para integrar diversas metodologías y datos actualizados contribuye a mejorar la calidad de los diseños hidrológicos y facilita la planificación y gestión de recursos hídricos. Se sugiere considerar la inclusión de Cal IDF-G como herramienta de apoyo al diseño hidrológico en el Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS, el cual está en proceso de actualización.

Agradecimientos

Nuestro profundo agradecimiento al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por proporcionar la información de las cartas pluviográficas de las diferentes estaciones. También, se agradece al Semillero de Investigación en Hidrología Urbana (SIHU), por las actualizaciones de las 26 curvas IDF en el Caribe Colombiano.

Referencias

- Chen, C-I. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12): 1603-1621.
- Díaz-Granados, M., Puente, X. (2008). Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena, Colombia.
- Fuentes, C., Rodríguez, E., Villarreal, E., (2018). HIDFUN una herramienta para la extracción y análisis de pluviogramas. Aceptado en el XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Buenos Aires, Argentina. Septiembre de 2018.
- IDEAM-UNAL. (2016). Estudio de Actualización y Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia Disponibles en el IDEAM. Convenio Interadministrativo No. 113 de 2016. Bogotá D.C.
- Pulgarin, E., & Poveda, G. (2008). Estimación de curvas IDF basadas en las propiedades de escala de la lluvia. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Rodríguez, E. y Ávila, K. (2022). Caracterización sub-diaria de tormentas extremas en Colombia. ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLUMEN 2 – HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y

SUBTERRÁNEA. Brasil. ISBN 978-90-832612-3-2. pp: 263 - 274. IAHR. Publicada en 2023. Madrid - España.

Sandoval, J., Rodríguez, E., González, A., Patarroyo, M. (2024). Optimización de curvas IDF derivadas de IMERG en Colombia. XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Medellín-Colombia.

Smith, E L, & Stephenson, A G. (2009). An extended Gaussian max-stable process model for spatial extremes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 139(4), 1266–1275.

Torres, L., Agudelo, L., Rincón, F., Mercado, I., Guzmán, D., Bayona, J., Cuavas, J., Bonilla, A., Ochoa, N., Villamizar, A., Rodríguez, E., Velandia, K., Reyes, G. (2021). Un aporte a la caracterización de lluvias extremas en el Caribe Colombiano a través de la construcción de curvas intensidad- duración- frecuencia. MEMORIAS. XXIV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. I SOMPOSIO DE ECOHIDROLOGÍA Y ECOHIDRÁULICA. BARRANQUILLA, 20 AL 24 DE SEPTIEMBRE, 2021. pp: 132 – 147. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Colombia.

Torres, L., Ávila, K., Villamizar, A., Moreno, A., Barrera, K., Mendoza, M., Gómez, D., Rubio, A., Mendieta, B., Molano, J., Niño, G., Medina, L., Gutiérrez, B., Suárez, S., Melo, J., Yanalá, J., Rodríguez, E. (2024). Aporte al diseño hidrológico en el Caribe colombiano a través de nuevas curvas IDF. MEMORIAS. XXV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA. 05 AL 07 DE JUNIO DE 2024 - BOGOTÁ. ISSN: 2619-3787 (En línea). pp: 39 – 53. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Colombia.

Vargas M, R., & Díaz-Granados O, M. (1998). Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. XIII Seminario de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Cali, agosto 1998.

Villamizar, A., Rodríguez, E., & Villarreal, E. (2018). Desarrollo de una Calculadora de Curvas IDF Generalizadas para Colombia. XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.

Villamizar, Alexander & Rodríguez, Erasmo (2022). Validación de la Calculadora de Curvas Sintéticas IDF en el Caribe Colombiano. ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 2 – HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA. Brasil. ISBN 978-90-832612-3-2. pp: 441 - 451. IAHR. Publicada en 2023. Madrid - España.

Zamora A., D. A., Figueroa O., C. Albeiro., Rodríguez s., E. A. & Piña F., A. P. (2016). dazamora/IDFtool. GitHub. Plataforma R. <https://github.com/dazamora/IDFtool>