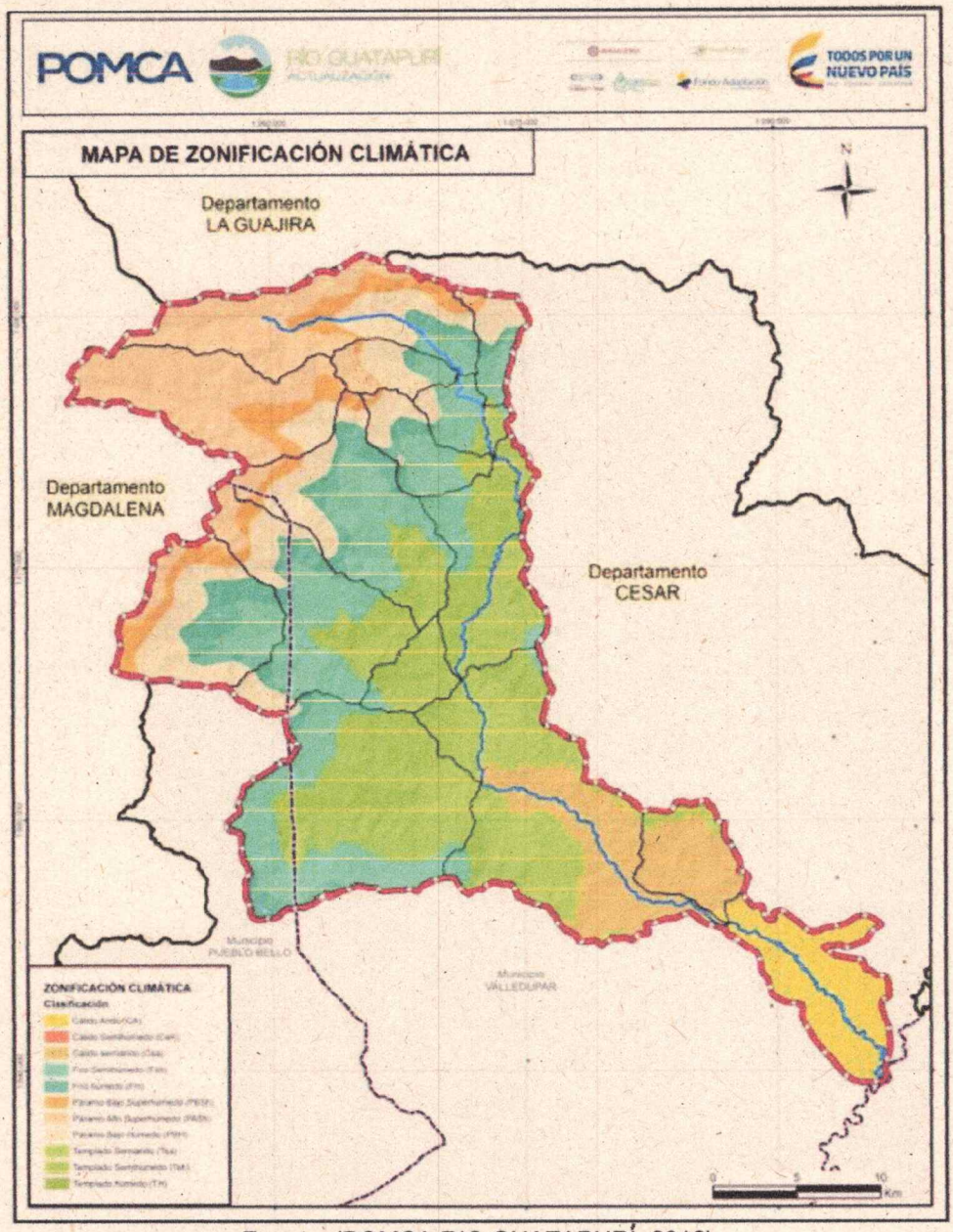
Figura 15. Zonificación Climática río Guatapurí



Fuente: (POMCA RIO GUATAPURÍ, 2018)

Caracterización Morfométrica

Existe una gran variedad de estudios que aplican diferentes metodologías con el fin de establecer las características representativas en las cuencas hidrológicas y por tanto su caracterización morfométrica (Díaz, 2019); así mismo, como lo menciona Koshak & Dawod (2011) la caracterización de una cuenca hidrográfica es un aspecto indispensable para la implementación de proyectos de gestión de recursos hídricos, es por eso que la determinación de sus parámetros morfométricos son tareas comunes tanto en los estudios para la gestión del recurso hídrico como para la gestión del riesgo de desastres; a continuación se muestran los parámetros usados para la caracterización de las 11 cuencas en mención:

Tabla 1. Parámetros utilizados para la caracterización morfométrica

Índice	Definición	Ecuación
Relieve (Km)	Este índice se define como la diferencia de la cota máxima (Hmax) y mínima de la cuenca (Hmin) (Km).	$R = Hmax - Hmin$
Relación de relieve	Este índice se define como la relación entre el relieve (Km) y la longitud de la cuenca (Km).	$Rh = R/L$
Área de drenaje (Km^2)	Corresponde al área plana en proyección horizontal de la cuenca y es ampliamente usado como índice morfométrico para identificar la torrencialidad.	A
Pendiente media de la cuenca (m/m)	Se entiende como el valor medio de la inclinación del terreno, respecto a la horizontal, sobre la cual se ubica la cuenca.	P
Longitud Axial	Está definido como la distancia planimétrica en línea recta entre el ápice del abanico (o zona de depósito) y el punto más lejano sobre el límite de la cuenca.	La
Densidad de Drenaje	La densidad de drenaje es un índice hidrológico que describe la intensidad del drenaje en una cuenca hidrográfica. Se define como la longitud total de los canales de drenaje (ríos, arroyos, quebradas, etc.) por unidad de área de la cuenca.	Dd = L / A
Tiempo de concentración	Se entiende como el tiempo (min) que demoran todos los puntos de una cuenca en aportar agua de escorrentía, de forma simultánea, al punto de salida de la cuenca.	*Tc (Ver tabla x)*

Elaboración propia a partir de: (Ramos et al., 2021)(Machuca et al., 2024)

Aunque hay varias funciones y métodos para calcular el tiempo de concentración en una cuenca, es muy importante elegir aquellas que se adapten a las características específicas de la cuenca que se está estudiando. Esto contribuye a que los cálculos sean lo más aproximados y reflejen de mejor manera las condiciones hidrológicas de la cuenca en cuestión. En el marco de este estudio, se han seleccionado las ecuaciones que se consideran la más adecuadas según las características particulares de las cuencas analizadas (Ver Tabla 2), las ecuaciones escogidas se muestran a continuación:

Tabla 2. Ecuaciones de tiempo de concentración

Autor	Ecuación	Características
Temez	$Tc = 0.30 * L^{0.76} * H^{-0.19}$	Estudiada en cuencas naturales de España.
Bransy Williams	$Tc = 0.605 * L * (100S)^{-0.2} * A^{-0.1}$	Especialmente recomendada para cuencas rurales.
Ventura	$Tc = 4 * A^{0.5} * L^{0.5} * H^{-0.5}$	Estudiada en cuencas rurales en Italia.

Fuente: (Azizian, 2018)

La caracterización morfométrica de una cuenca es fundamental para comprender sus procesos hidrológicos, ya que permite identificar aspectos clave como la forma, el relieve, la densidad de drenaje y la pendiente, todos los cuales afectan la velocidad y el volumen de escorrentía. Este análisis proporciona datos esenciales para la modelación de caudales y la planificación de infraestructuras hídricas. Luego de realizar la caracterización de las cuencas a través de herramientas SIG, y el software HEC-HMS se obtuvieron los resultados de cada parámetro morfométrico los cuales se representan en la Tabla 2, donde se presentan las principales características morfométricas de las 11 subcuencas del río Guatapurí, lo cual facilita una evaluación comparativa y detallada para mejorar la gestión de los recursos hídricos en cada sección específica.

Tabla 3. Parámetros morfométricos de las 11 cuencas en mención

	CUENCAS										
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AREA (Km2)	133.42	94.50	96.96	60.38	34.72	84.95	39.89	128.89	37.06	102.53	32.87
PERÍMETRO (Km)	90.15	74.78	73.60	56.19	41.16	55.73	36.76	65.14	37.84	73.52	38.52
LONGITUD CUENCA (Km)	24.29	19.97	18.09	14.60	11.56	13.72	8.66	14.03	8.72	16.38	8.98
ANCHO CUENCA (Km)	5.49	4.73	5.36	4.14	3.00	6.19	4.61	9.19	4.25	6.26	3.66
LONGITUD RIO PRINCIPAL (Km)	31.06	24.72	28.14	20.26	14.01	17.12	13.02	18.48	11.55	20.13	12.36
COTA MÁXIMA CUENCA (m)	5365	5445	3783	4349	4405	4290	2672	3149	2615	2433	1510
COTA MÍNIMA CUENCA (m)	1626	1778	843	1044	1463	1508	827	712	624	251	215
COTA MÁXIMA RÍO PRINCIPAL (m)	4910	4396	3465	4195	4404	3877	2435	2731	2548	615	1083
COTA MÍNIMA RÍO PRINCIPAL (m)	1626.00	1778.00	843.00	1044.00	1463.00	1508.00	827.00	712.00	624.00	251.00	215.00
PENDIENTE MEDIA CUENCA (%)	69.8%	70.7%	58.9%	72.2%	75.7%	33.8%	62.0%	29.1%	26.7%	43.4%	37.4%
PENDIENTE MEDIA RÍO PRINCIPAL (%)	10.6%	10.6%	9.3%	15.6%	21.0%	13.8%	12.4%	10.9%	16.7%	1.8%	7.0%
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (min)	270.26	218.16	256.24	180.62	129.61	187.41	136.39	218.76	137.11	218.81	144.80
RELIEVE (m)	3830	3708	3522	3419	3025	2914	1845	2493	1991	2247	1295
RELACION DE RELIEVE	0.116	0.141	0.116	0.159	0.200	0.160	0.128	0.122	0.161	0.080	0.097

DENSIDAD DE DRENAJE	0.200	0.200	0.267	0.234	0.195	0.170	0.286	0.168	0.252	0.230	0.169

Elaboración propia

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3, se observa lo siguiente:

Cuenca 1: Esta cuenca tiene un área de 133.42 km² y un perímetro de 90.15 km, lo que sugiere una configuración espacial amplia con alta capacidad de captación hídrica. La longitud de la cuenca de 24.29 km, junto a una pendiente media de 69.8%, indica una rápida respuesta hidrológica ante eventos pluviométricos. La pendiente del cauce principal es del 10.6%, lo cual favorece un flujo continuo sin llegar a ser excesivamente erosivo. Con un relieve de 3830 m y un tiempo de concentración de 270.26 minutos, esta cuenca tiene un tiempo de respuesta ágil, aunque no inmediato, lo que facilita el control de caudales máximos.

Cuenca 2: Con un área de 94.50 km² y un perímetro de 74.78 km, esta cuenca presenta una forma moderadamente compacta, adecuada para una rápida escorrentía. Su longitud de 19.97 km y pendiente media de 70.7% indican una alta reactividad frente a precipitaciones. La pendiente del cauce principal de 10.6% contribuye a un transporte eficiente del caudal sin grandes riesgos de erosión. El relieve de 3708 m y el tiempo de concentración de 218.16 minutos permiten una respuesta ágil a las lluvias, con menor posibilidad de formación de picos extremos.

Cuenca 3: Esta cuenca, con un área de 96.96 km² y un perímetro de 73.60 km, presenta una configuración intermedia en tamaño. Su longitud de 18.09 km y pendiente media de 58.9% sugieren una buena capacidad de escorrentía. La pendiente del cauce principal de 9.3% permite un flujo controlado y continuo. Su relieve de 3522 m y el tiempo de concentración de 256.24 minutos proporcionan una combinación de rapidez y control, lo que modera el impacto de eventos de alta intensidad.

Cuenca 4: Con un área de 60.38 km² y un perímetro de 56.19 km, esta cuenca es compacta y tiene una longitud corta de 14.6 km, con una elevada pendiente media de 72.2%. Estas características indican un comportamiento torrencial. La pendiente del río principal de 15.6% contribuye a una alta capacidad de evacuación de caudal, pero también a un mayor potencial erosivo. Su relieve de 3419 m y el tiempo de concentración de 180.62 minutos hacen que responda con rapidez a precipitaciones, aumentando el riesgo de picos de caudal.

Cuenca 5: Con un área de 34.72 km² y perímetro de 41.16 km, esta cuenca es altamente compacta, facilitando una rápida respuesta hidrológica. Su longitud de 11.56 km y pendiente media de 75.7% sugieren una alta escorrentía superficial. La pendiente elevada del cauce principal (21.0%) indica un flujo acelerado, con posibilidad de erosión. El relieve de 3025 m y el tiempo de concentración bajo (129.61 minutos) refuerzan su reactividad ante lluvias intensas.

Cuenca 6: De área intermedia (84.95 km²) y perímetro de 55.73 km, esta cuenca presenta una forma moderadamente compacta. Su longitud de 13.72 km y pendiente media de 33.8% permiten un flujo controlado y menos erosivo. La pendiente del cauce principal de 13.8% garantiza un transporte de caudal eficiente. Con un relieve de 2914 m y tiempo de concentración de 187.41 minutos, la cuenca tiene una capacidad de respuesta moderada, reduciendo la probabilidad de picos extremos de caudal.

Cuenca 7: Esta cuenca, con un área de 39.89 km² y un perímetro de 36.76 km, es compacta y tiene una alta reactividad. Su longitud de 8.66 km y pendiente media de 62.0% favorecen una escorrentía rápida. La pendiente del río principal de 12.4% mantiene un flujo sostenido. El relieve de 1845 m y tiempo de concentración de 136.39 minutos contribuyen a una respuesta rápida, con posibilidad de picos de caudal significativos en eventos de lluvia.

Cuenca 8: Con un área de 128.89 km² y perímetro de 65.14 km, es una cuenca grande y alargada. Su longitud de 14.03 km y pendiente media de 29.1% permiten un flujo hidrológico más controlado. La pendiente del cauce principal es de 10.9%, garantizando una evacuación constante de caudal. Su relieve de 2437 m y tiempo de concentración de 218.76 minutos sugieren una respuesta sostenida, moderada en intensidad.

Cuenca 9: Con un área de 37.06 km² y perímetro de 37.84 km, esta cuenca es compacta y tiene una rápida reactividad. Su longitud de 8.72 km y pendiente media de 26.7% permiten una escorrentía menos intensa. La pendiente del río principal de 16.7% asegura un flujo acelerado, con posibilidades de erosión en eventos fuertes. Su relieve es de 1991 m y el tiempo de concentración de 137.11 minutos permite picos de caudal tras lluvias intensas.

Cuenca 10: Con un área de 102.53 km² y un perímetro de 73.52 km, esta cuenca es grande y alargada, con una longitud de 16.38 km y pendiente media de 43.4%, lo cual favorece una evacuación moderada del caudal. La pendiente del cauce principal de 1.8% sugiere un flujo lento y controlado. Su relieve de 2182 m y tiempo de concentración de 218.81 minutos confieren una respuesta gradual y sostenida ante precipitaciones.

Cuenca 11: La cuenca más pequeña, con 32.87 km² de área y un perímetro de 38.52 km, es compacta y tiene una rápida reactividad hidrológica. Su longitud de 8.98 km y pendiente media de 37.4% favorecen un flujo controlado. La pendiente del cauce principal de 7.0% asegura una escorrentía moderada. Con un relieve de 1295 m y un tiempo de concentración bajo (144.80 minutos), esta cuenca responde rápidamente a eventos de lluvia, manteniendo cierta moderación en los picos de caudal.

Caracterización hidrológica

La caracterización hidrológica de las lluvias es un aspecto fundamental en la gestión y planificación de recursos hídricos. Este proceso implica el análisis y la descripción de los patrones de precipitación en una región específica, considerando variables como la intensidad, la duración y la frecuencia de las lluvias. Comprender estos patrones es crucial para diversas aplicaciones, como el diseño de infraestructuras hidráulicas, la planificación del uso del suelo, la gestión de cuencas y la prevención de desastres naturales. La lluvia no solo es un componente esencial del ciclo hidrológico, sino que también influye directamente en la disponibilidad de agua para el consumo humano, la agricultura y la industria. Además, la caracterización de las lluvias permite identificar tendencias climáticas y cambios en los patrones de precipitación, lo que es vital para la adaptación a fenómenos climáticos extremos, como sequías e inundaciones. En un contexto de cambio climático, donde la variabilidad y la incertidumbre aumentan, contar con información precisa sobre la lluvia se convierte en una herramienta indispensable para la sostenibilidad y la resiliencia de las comunidades. Así, la caracterización hidrológica de las lluvias no solo apoya la gestión de recursos, sino que también contribuye a la mitigación de riesgos y al desarrollo sostenible.

En el presente estudio, la caracterización hidrológica se basa en el análisis de las precipitaciones, donde según Reyes, Munevar, et al., (2021) Un análisis adecuado permite caracterizar las condiciones hidrológicas de la zona permitiendo una mejor interpretación de las lluvias de la zona con el fin de realizar una buena gestión del recurso hídrico. El análisis se llevó a cabo por medio de la información de la red hidro climatológica que maneja el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Se destaca que, en un inicio, se propuso realizar la caracterización hidrológica utilizando estaciones hidroclimatológicas de caudal dentro de la red hidrográfica. Sin embargo, se encontró que las estaciones disponibles carecían de datos actualizados, ya que el último registro correspondía al año 2007. Esta situación limitó la capacidad de obtener información relevante y precisa para el estudio.
Dada esta circunstancia, se optó por seguir la metodología de escorrentía directa, la cual permite estimar caudales a partir de datos de precipitación más recientes. Esta metodología no solo facilitó la obtención de datos actualizados, sino que también proporcionó una aproximación más realista y confiable de los caudales a evaluar. La escorrentía directa es una técnica ampliamente reconocida que considera las características específicas de la cuenca y permite adaptar el análisis a las condiciones actuales, lo que resulta crucial para la gestión adecuada de recursos hídricos y la planificación de infraestructuras. De esta manera, se logró una evaluación más efectiva y pertinente de los caudales, alineándose con las necesidades del proyecto y los objetivos de investigación. Para lo anterior se siguieron los siguientes pasos:

Selección de estaciones meteorológicas:

Con el fin de analizar el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, se seleccionaron las estaciones pluviométricas en un perímetro de 15 kilómetros respecto a las cuencas considerando que esta distancia permite abarcar estaciones que pueden llegar a representar de mejor manera el comportamiento de las precipitaciones dentro de las cuencas y a su vez contenga información suficientemente completa para llevar a cabo el análisis de la serie de datos de las precipitaciones. Después de realizar esta búsqueda se ha encontrado que las estaciones más cercanas a las cuencas y con mejor registro de datos son:

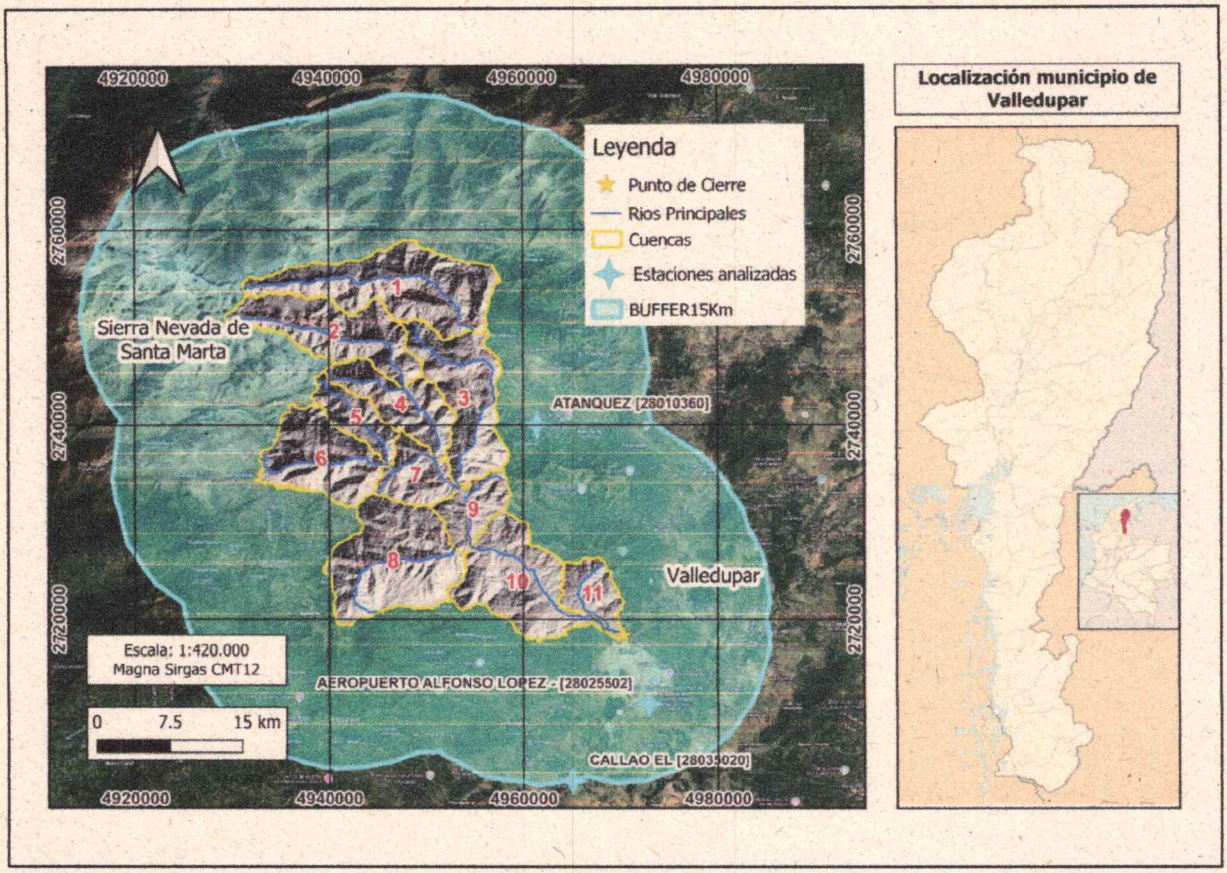
Tabla 4. Estaciones hidroclimatológicas seleccionadas en la zona de estudio

Código	Nombre	Categoría	Localización	
			Latitud (m)	Longitud (m)
28010360	ATANQUEZ	PM	10.70	-73.35
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	SP	10.44	-73.25

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran las estaciones seleccionadas dentro del área de estudio:

Figura 16. Estaciones seleccionadas dentro del área de estudio

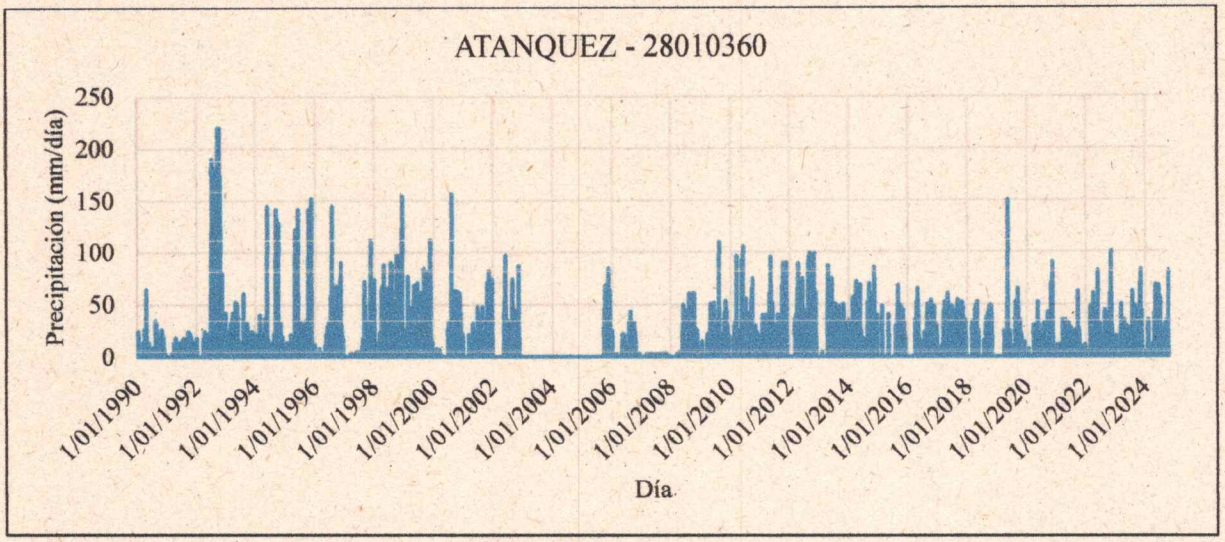


Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio, se seleccionó el periodo comprendido entre el 01/01/1990 al 31/12/2023 para ATANQUEZ resaltando que se suprimieron los años (2003, 2004 y 2005 debido a que presentaban datos faltantes mayores al 90%) y el periodo entre 01/01/1990 al 31/12/2019, lo cual abarca un total de 31 y 30

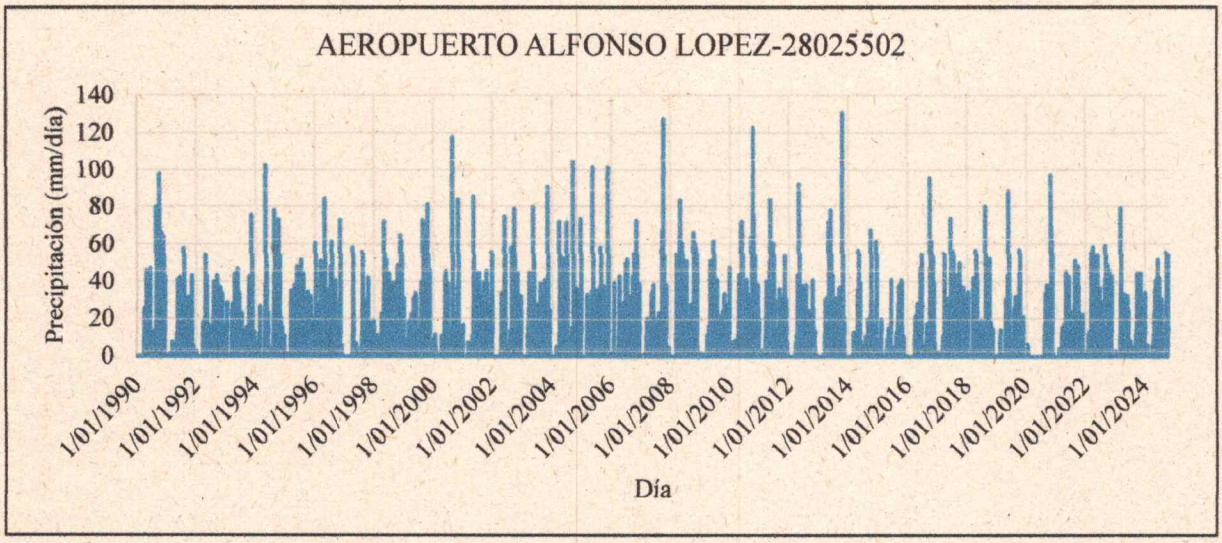
años respectivamente, este rango de tiempo se considera conveniente para el análisis de las precipitaciones en las estaciones seleccionadas puesto que puede proporcionar información importante sobre las tendencias y variaciones climáticas en la cuencas hidrológicas. En la Figura 17 y en la Figura 18 se muestran las series de precipitaciones para el periodo seleccionado en ambas estaciones. Estas gráficas proporcionan una visualización clara de las variaciones y patrones de las precipitaciones a lo largo del tiempo:

Figura 17. Serie histórica de precipitaciones Estación Atanquez



Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Serie histórica de precipitaciones Estación Aeropuerto Alfonso López



Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos hidrológicos

De acuerdo con Romero, (2015) los datos registrados de las estaciones pluviométricas deben ser revisados previo a ser usados en cualquier análisis, puesto que estos pueden mostrar inconsistencias o ausencias de datos. Con el fin de detectar la regularidad o irregularidad de los datos hidrológicos, inicialmente se debe analizar de manera visual la distribución de toda la información disponible para posteriormente efectuar el análisis. Lo deseable es que los registros estén constituidos por una larga secuencia de observaciones; sin embargo, mientras más largo sea el periodo de registro, mayor será la probabilidad de error.

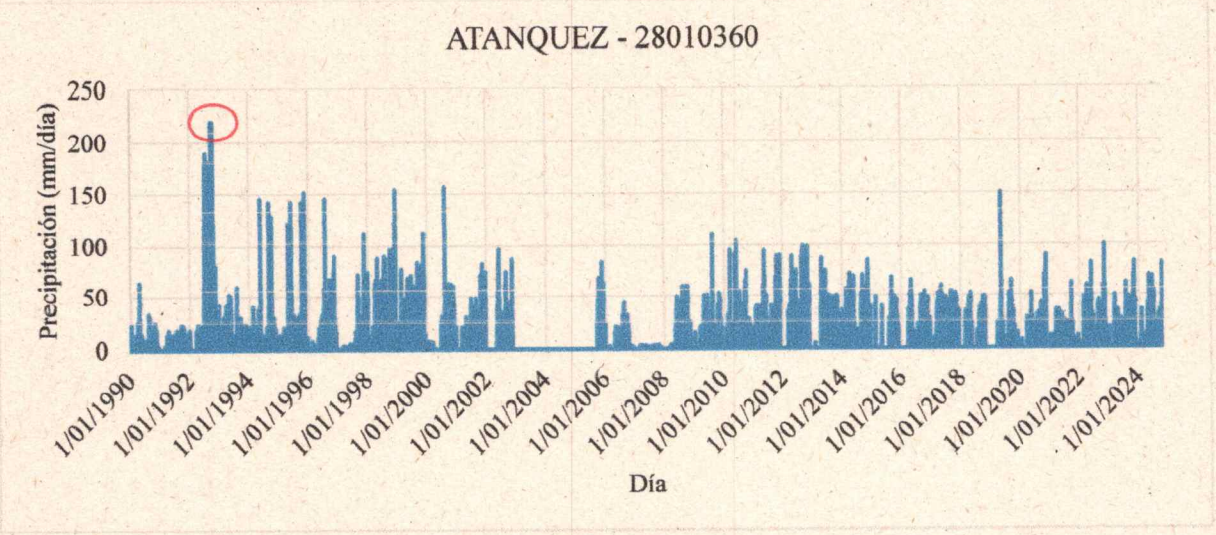
Validez de datos extremos

El análisis de consistencia de datos desempeña un papel fundamental al evaluar la información de estaciones hidroclimatológicas con registros de precipitación. Este análisis permite verificar la confiabilidad y calidad de los datos existentes, a la vez que ayuda a identificar posibles errores e inconsistencias en la serie histórica de precipitaciones.

Para el presente estudio, se ha tenido en cuenta la información suministrada por el IDEAM en su reporte de Lluvias Máximas en 24 Horas Totales Anual Multianual Periodo 1981-2010. Según dicho informe, en la zona de estudio se observa una precipitación máxima en 24 horas que oscila entre 175 y 200 milímetros. En consecuencia, se ha adoptado el valor máximo de 200 mm/día como el límite máximo para considerar una precipitación probable. Esto significa que valores de lluvia superiores serán considerados inicialmente como atípicos.

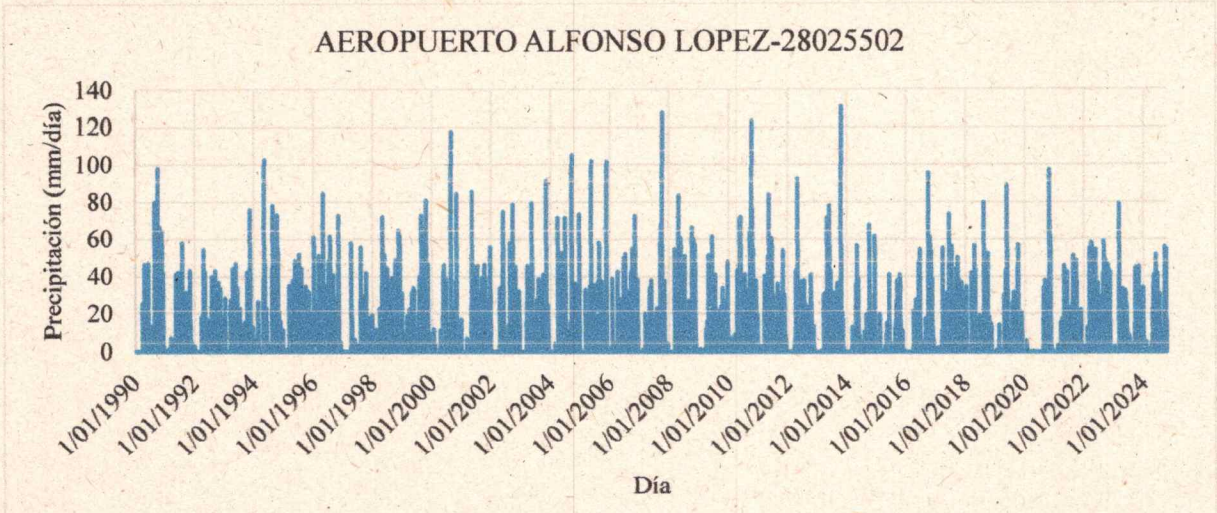
No obstante, se analizarán otros escenarios, como el ENSO y las mediciones de estaciones cercanas, para definir si el dato en cuestión es susceptible a ser removido, a continuación, se muestran las gráficas de las series históricas de lluvias en 24 horas con los valores atípicos que superan el valor de 200 mm/día:

Figura 19. Gráfica estación ATANQUEZ – Posibles atípicos



Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Gráfica estación Aeropuerto – Posibles atípicos



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 19, para el caso de las estaciones Atanquez, las series históricas de precipitaciones diarias presenta un valor por encima de 200, lo cual podría indicar que podría ser atípico, sin embargo de acuerdo con las precipitaciones de días previos y posteriores se deduce que este valor si es posible de que ocurriera y por tanto no se elimina.

Llenado de datos faltantes

Las estaciones hidroclimatológicas suelen tener registros incompletos debido a diversas causas, como deficiencias en la instrumentación, errores humanos o interrupciones en la toma de registros. Estos datos faltantes deben completarse para obtener una serie confiable que permita analizar el comportamiento de las variables hidroclimatológicas en el lugar de estudio. En el presente caso, se seleccionaron dos estaciones que registran precipitaciones para analizar el comportamiento de las lluvias en las cuencas. Se estableció como periodo de análisis el rango de tiempo entre 01/01/1990 al 31/12/2023 para ATANQUEZ y entre 01/01/1990 al 31/12/2019 para el aeropuerto, ya que este intervalo presentó continuidad en el registro de las precipitaciones en ambas estaciones. Se filtraron los días sin registros, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Porcentaje anual de datos faltantes en cada estación

Año	%Datos Faltantes	
	ATANQUEZ	AEROPUERTO
1990	0%	8%
1991	0%	0%
1992	0%	0%
1993	0%	0%
1994	0%	0%
1995	0%	0%
1996	0%	0%
1997	0%	2%
1998	1%	0%
1999	0%	0%
2000	0%	0%
2001	0%	0%
2002	8%	0%
2003	100%	0%
2004	100%	0%
2005	73%	9%
2006	0%	0%
2007	0%	8%
2008	0%	0%
2009	0%	7%
2010	0%	1%
2011	0%	0%
2012	0%	0%
2013	0%	0%
2014	0%	1%
2015	0%	2%

2016	0%	0%
2017	0%	0%
2018	0%	0%
2019	0%	0%
2020	0%	50%
2021	0%	56%
2022	0%	64%
2023	1%	70%

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, se encontró que en la estación ATANQUEZ en el periodo seleccionado alcanza un porcentaje del 8 % de datos faltantes, mientras que la estación AEROPUERTO posee un porcentaje de 10% de datos faltantes, indicando que las estaciones alcanzan un buen registro de datos de precipitaciones lo cual resulta ser óptimo para la caracterización hidrológica de las cuencas, sin embargo, es importante destacar que para la estación ATANQUEZ, en el años 2003, 2004 y 2005 hay un vacío considerable de datos, por tanto se eliminan en el estudio hidrologicolo ya que es un periodo demasiado extenso para ser completado. Por otra parte, la estación Aeropuerto no muestra años con porcentajes de datos faltantes tan altos a excepción del 2020, 2021, 2022 y 2023, por tanto el periodo de estudio de esta estación será del 01/01/1990 al 31/12/2019.

Posteriormente se realizó el relleno de datos faltantes para la estación Las Estrellas a través del método IDW, de acuerdo con Teegavarapu & Chandramouli, (2005) El método de Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW) es una metodología eficiente para rellenar datos faltantes de precipitación, la cual se basa en una suma ponderada de los datos existentes, encontrando que la influencia de un punto respecto al valor que se requiere encontrar es directamente proporcional a la distancia que los separa. De igual forma se menciona que el método IDW es útil para estimar datos faltantes de lluvia en diversas ubicaciones, y ha resultado ser favorable respecto a otros métodos; la ecuación que utiliza este método para calcular el dato faltante se presenta a continuación:

$$Zp = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{(d_i)^{\alpha}}}{\sum_{i=1}^{n} (1/d_i)^{\alpha}} \qquad (1)$$

Donde:

Z_p: Valor estimado en el punto P

N: Número de puntos usados en la interpolación

Z_i: Es el valor conocido en el i-ésimo punto.

d_i: Distancia desde el punto conocido i al punto a estimar p.

α: Potencia del inverso de la distancia

Con el fin de rellenar los datos de la estación Las estrellas, se tuvieron en cuenta las estaciones cercanas a éstas, donde se consideró la similitud de las altitudes y su correlación entre los registros, para esto último, las estaciones seleccionadas fueron:

Tabla 6. Estaciones seleccionadas para el llenado de datos faltantes

Código	Nombre	Categoría	Localización	
			Latitud (m)	Longitud (m)
28035020	CALLAO EL	CO	10.36	-73.32
28010360	ATANQUEZ	PM	10.70	-73.35
28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ	SP	10.44	-73.25

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se completaron las series históricas de cada año y se procedió a realizar el análisis de las lluvias.

Precipitación Media Anual Multianual

Las precipitaciones medias anuales de las estaciones de análisis se muestran en las Tabla 7 y Tabla 8 para el período de estudio de cada estación:

Tabla 7. Precipitación media anual para ATANQUEZ

AÑO	PANUAL
1990	638.7
1991	884.7
1992	3492.2
1993	1794.7
1994	2038.7
1995	2335.9
1996	1898.1
1997	770.6
1998	3816.0
1999	3532.8
2000	696.0
2001	1678.8
2002	1165.9
2006	719.4
2007	213.7
2008	1620.2
2009	1975.8
2010	3304.4
2011	3298.5
2012	4498.1
2013	2760.0
2014	3761.8
2015	1360.3

2016	2299.6
2017	3650.8
2018	2280.2
2019	1023.5
2020	1373.0
2021	1015.0
2022	1892.0
2023	1622.0
PMA	2045.5

Fuente: Elaboración propia

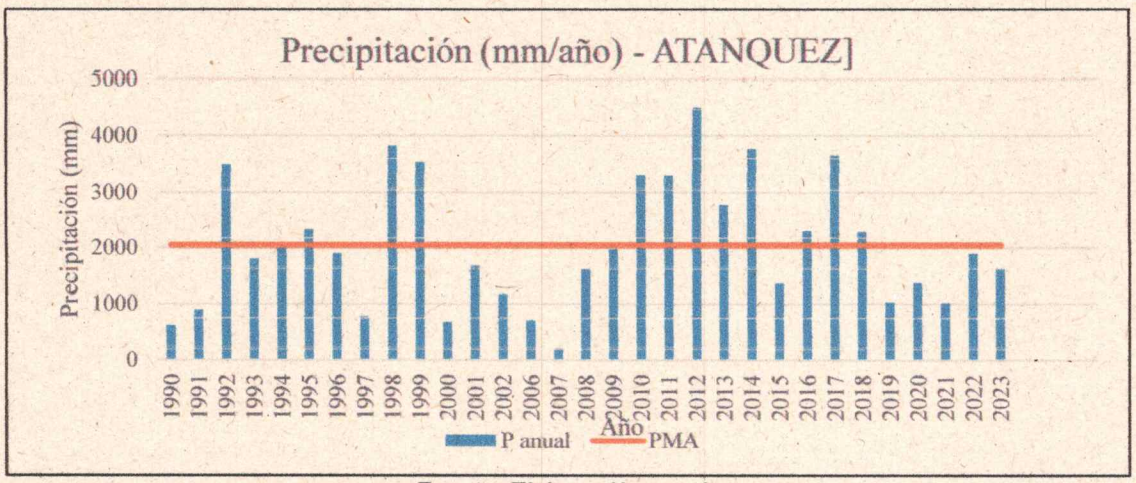
Tabla 8. Precipitación media anual para AEROPUERTO

AÑO	PANUAL
1990	1259.6
1991	644.5
1992	708.3
1993	963.9
1994	997.7
1995	1169.9
1996	1247.5
1997	506.0
1998	1376.1
1999	1196.7
2000	845.7
2001	929.7
2002	843.9
2003	1097.5
2004	832.4
2005	1267.6
2006	969.7
2007	1091.2
2008	1353.7
2009	846.9
2010	1583.2
2011	1207.5
2012	953.4
2013	1096.2
2014	697.3
2015	495.9

2016	948.5
2017	1214.2
2018	805.5
2019	827.0
PMA	999.2

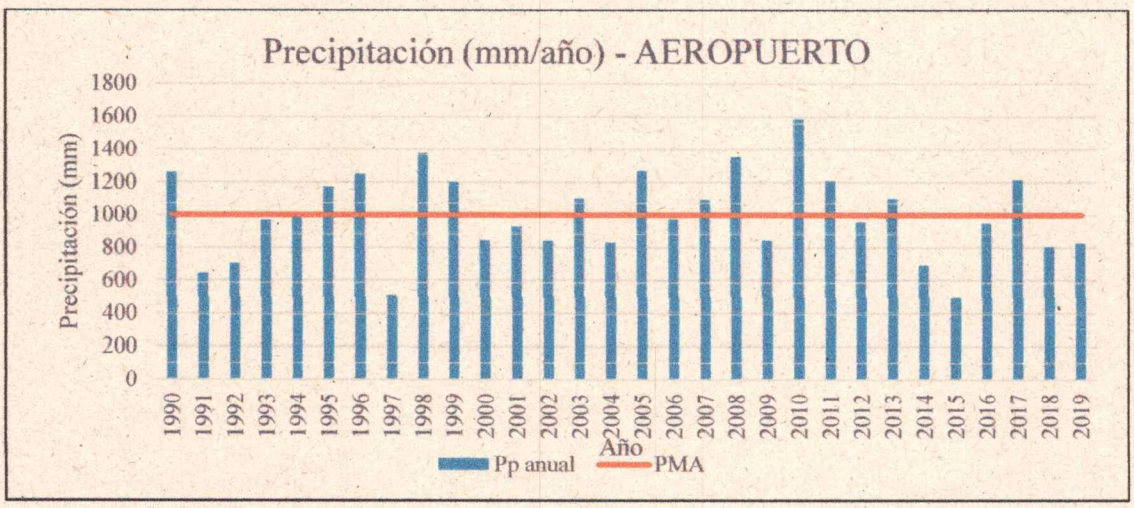
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Precipitación Media Anual en la estación ATANQUEZ



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Precipitación Media Anual en la estación AEROPUERTO



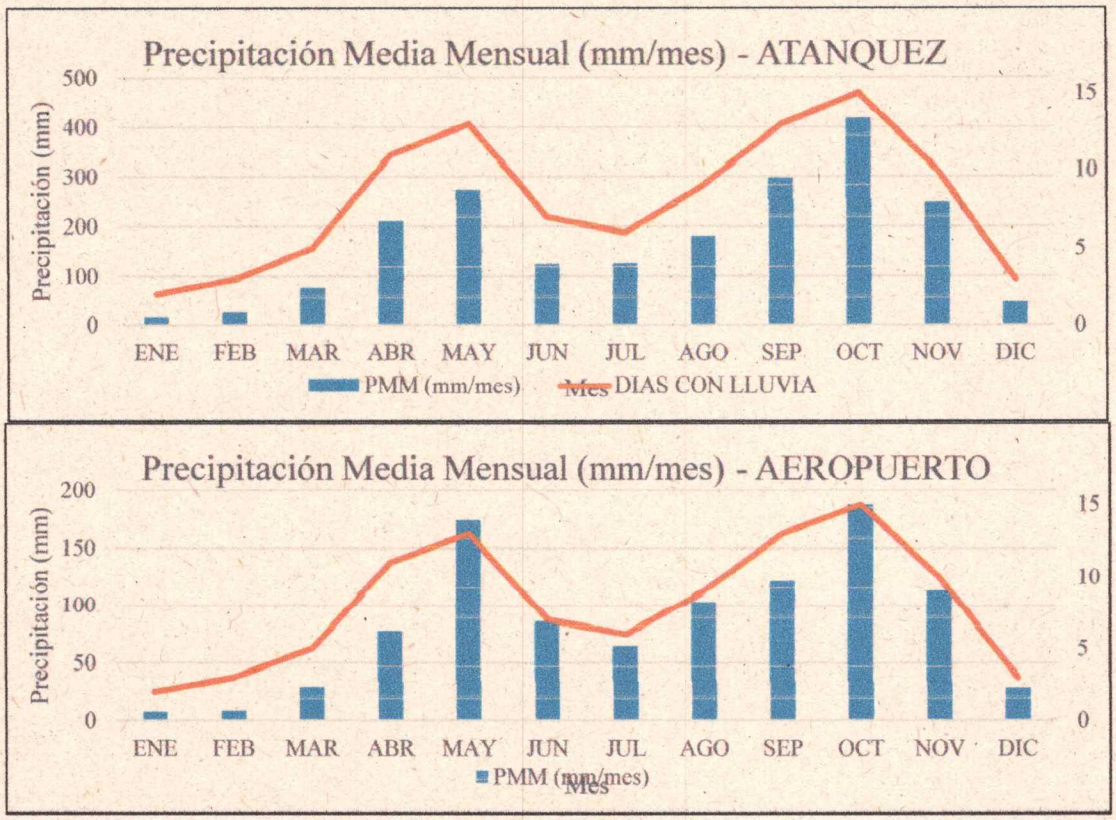
Fuente: Elaboración propia

Las precipitaciones medias anuales de las estaciones de análisis dentro del área de estudio tienen un valor de 2045.532 mm anuales en ATANQUEZ y 999.245 mm en el Aeropuerto.

Precipitación Media Mensual Multianual

Se llevaron a cabo análisis de los registros de lluvia entre los años 01/01/1990 al 31/12/2023 para ATANQUEZ y entre 01/01/1990 al 31/12/2019 para el Aeropuerto con el fin de obtener los histogramas de la precipitación promedio mensual a lo largo de varios años. El propósito fue evaluar la variabilidad mensual de la lluvia en la zona de estudio. Los resultados revelan un patrón de lluvias bimodal, con valores más altos durante los meses abril y mayo en el primer semestre del año, y en septiembre, octubre y noviembre en el segundo semestre. A continuación, se muestran las gráficas de la Precipitación Media Mensual Multianual y días con lluvia para cada estación:

Figura 23. Precipitación media mensual en las estaciones analizadas



Fuente: Elaboración propia

Construcción de curvas de intensidad – Duración – Frecuencia – idf

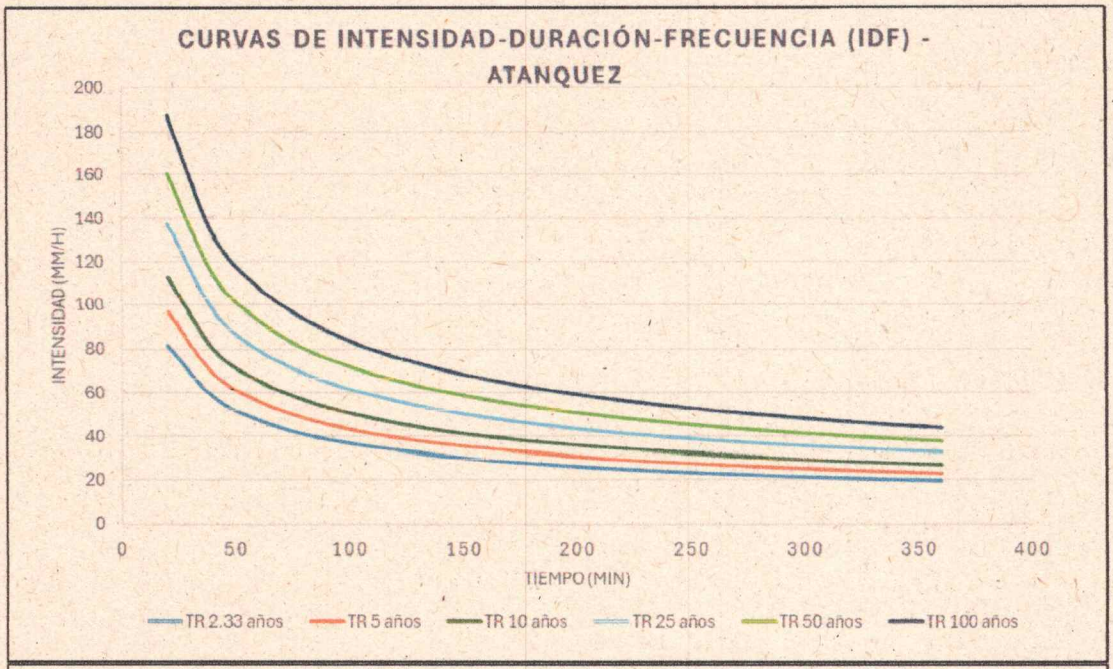
La construcción de las curvas IDF es necesaria para estimar el caudal líquido a partir de las precipitaciones. Estas curvas proporcionan información sobre la intensidad máxima de lluvia esperada en diferentes duraciones y frecuencias de ocurrencia, lo que es fundamental para el diseño de soluciones de ingeniería en el ordenamiento territorial y la infraestructura. Para la construcción de las curvas IDF, se optó por calcularlas de manera sintética utilizando el método de Vargas y Díaz Granados. Este método, consiste en localizar el área de estudio en una de las cinco regiones de Colombia, con el fin de obtener las constantes que describen las relaciones entre la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia, las cuales se ajustan a una distribución de probabilidades, lo que permite estimar la intensidad máxima de lluvia para diferentes períodos de retorno en la ubicación específica, la ecuación está definida de la siguiente manera:

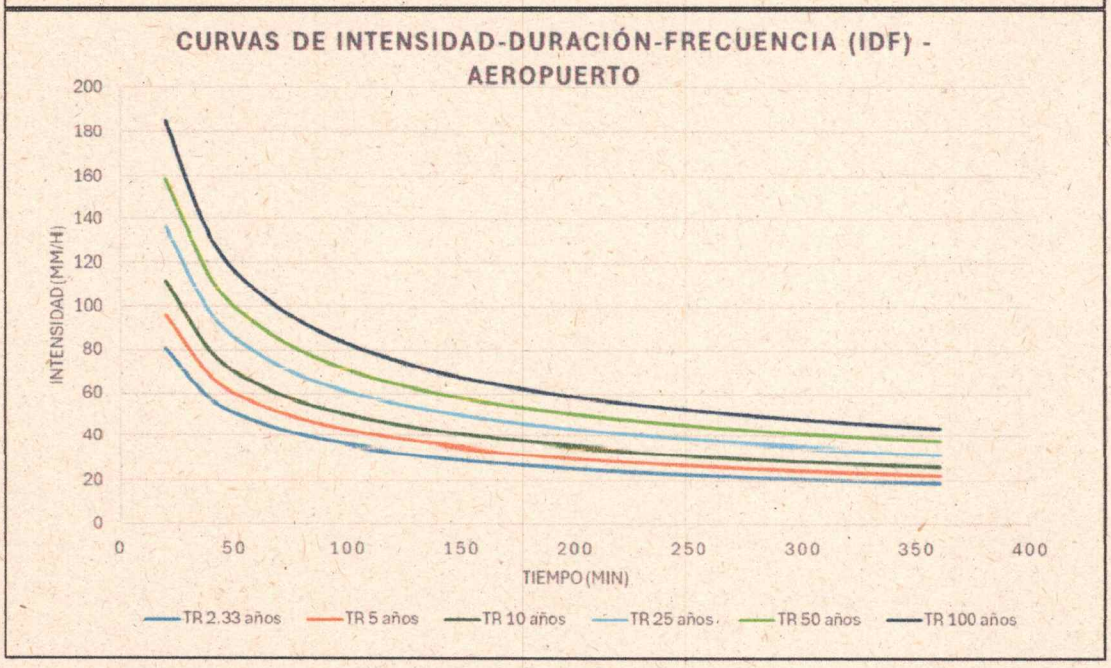
$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(\frac{t}{60})^c} \qquad (2)$$

i Intensidad en mm/hora
T Periodo de retorno en años
M Precipitación máxima promedio anual en 24 horas nivel multianual
t Tiempo de concentración en minutos

A partir de la ecuación anterior, se construyeron las curvas de intensidad, duración y frecuencia para Las Estrellas, obteniendo lo siguiente:

Figura 24. Curvas de Intensidad - Duración - frecuencia IDF estaciones analizadas





Fuente: Elaboración propia

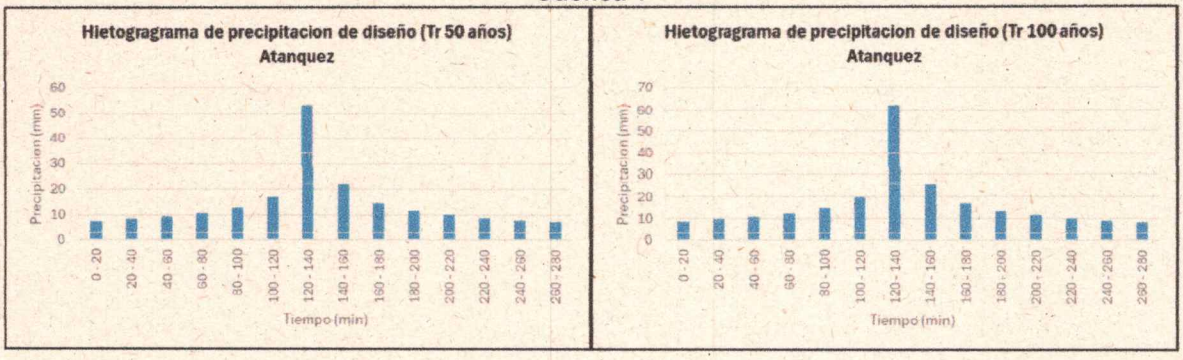
Según se muestra en la Figura 24, se observa que las precipitaciones más intensas en términos de duración y frecuencia ocurren en la estación de ATANQUEZ.

Cálculo de hietogramas para diferentes periodos de retorno.

De acuerdo con Chow, (1994), el método de bloques alternos se utiliza en hidrología para obtener hietogramas de diseño, que son representaciones de la distribución temporal de la lluvia durante un evento de precipitación. Este método se basa en la idea de que la intensidad de la lluvia varía a lo largo del tiempo, en lugar de mantenerse constante durante todo el evento. La premisa principal del método es dividir el evento de lluvia en intervalos de tiempo y asignar una intensidad de precipitación a cada intervalo se resalta que debido al área de influencia de cada estación, para el cálculo de los caudales se usa la estación ATANQUEZ para las subcuencas de la 1 a la 7, y la estación AEROPUERTO de la 8 a la 11; a continuación, se presentan los hietogramas de diseño para periodo de retorno de 50 y 100 años:

Figura 25. Hietogramas de diseño para la cuencas en estudio

Cuenca 1



Cuenca 2

