

# Fundamentos de Hidrología



Universidad Francisco  
de Paula Santander  
Vigilada Mineducación



Nelson Javier Cely Calixto  
Gustavo Adolfo Carrillo Soto  
Carlos Alexis Bonilla Granados





A decorative border made of small dots forms a large, open rectangular frame around the central text.

# **FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA**

NELSON JAVIER CELY CALIXTO  
GUSTAVO ADOLFO CARRILLO SOTO  
CARLOS ALEXIS BONILLA GRANADOS

Cely Calixto, Nelson Javier, autor

Fundamentos de hidrología / Nelson Javier Cely Calixto, Gustavo Adolfo Carrillo Soto, Carlos Alexis Bonilla Granados. -- Primera edición. -- San José de Cúcuta : Universidad Francisco de Paula Santander ; Pamplona, Norte de Santander : Universidad de Pamplona ; Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022.

94 páginas. -- (Ingenierías y afines. Hidrología, desarrollo sostenible y medio ambiente)

Incluye datos curriculares del autor -- Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-503-437-2 / e-ISBN 978-958-503-402-0

1. Hidrología - Fundamentos 2. Cuencas hidrográficas 3. Precipitación pluvial I. Carrillo Soto, Gustavo Adolfo, autor II. Bonilla Granados, Carlos Alexis, autor.

CDD: 551.48 ed. 23

CO-BoBN - a1095296

---



**Área:** Ingenierías y afines

**Subárea:** Hidrología, desarrollo sostenible y medio ambiente.



**Universidad Francisco  
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación



© Nelson Javier Cely Calixto  
© Gustavo Adolfo Carrillo Soto  
© Carlos Alexis Bonilla Granados

© Universidad Francisco  
de Paula Santander  
Avenida Gran Colombia  
No. 12E-96, Barrio Colsag  
San José de Cúcuta - Colombia  
Teléfono: 607 577 6655

© Universidad de Pamplona  
Km 1 Vía Bucaramanga  
Ciudad Universitaria  
Pamplona – Norte de Santander  
Teléfono: (57+7) 5685303

► Ecoe Ediciones S.A.S.  
info@ecoeediciones.com  
www.ecoeediciones.com  
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 919 80 02  
Bogotá, Colombia

**Primera edición:** Bogotá, julio del 2022

**ISBN:** 978-958-503-437-2  
**e-ISBN:** 978-958-503-402-0

Directora editorial: Claudia Garay Castro  
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.  
Corrección de estilo: Yaniana Castro  
Diagramación: Denise Rodríguez  
Carátula: Wilson Marulanda  
Impresión: Multi-impresos S.A.S.  
Calle 76 # 24 – 37  
Bogotá D.C. Colombia

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

*Impreso y hecho en Colombia–Todos los derechos reservados*

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA HIDROLOGÍA Y SUS APLICACIONES .....</b>	<b>1</b>
1.1 El ciclo hidrológico .....	4
1.2 Modelo del sistema hidrológico .....	8
1.3 Clasificación modelos hidrológicos.....	8
1.4 Aplicaciones de la hidrología.....	9
1.5 Definiciones .....	11
1.5.1 Circulación atmosférica.....	11
1.5.2 Vapor de agua .....	12
1.5.3 Precipitación .....	14
1.5.4 Lluvia.....	16
1.5.5 Evaporación .....	17
1.5.4 Lluvia.....	18
Referencias .....	20
<b>CAPÍTULO 2. LAS CUENCAS DE DRENAJE .....</b>	<b>23</b>
2.1 Definición.....	23
2.2 Características físicas de una hoya hidrográfica .....	28
2.2.1 Área de drenaje.....	29
2.2.2 Forma de la hoya .....	32
2.2.3 Sistema de drenaje.....	34
2.3 Características físicas usando software SIG.....	37
Referencias .....	41

<b>CAPÍTULO 3. LAS PRECIPITACIONES .....</b>	<b>45</b>
3.1 Generalidades .....	45
3.2 Precipitación, formación y tipos .....	48
3.3 Medidas pluviométricas .....	51
3.4 Precipitaciones puntuales y especiales .....	55
3.4.1 Método aritmético.....	55
3.4.2 Método de polígonos de Thiessen .....	56
3.4.3 Método de isoyetas.....	59
3.4.4 Método IDW .....	62
3.4.5 Método de krigin.....	62
3.5 Precipitaciones diarias y horarias.....	64
3.6 Curvas de masas y hietogramas de aguaceros puntuales de diseño con datos de precipitación históricos.....	64
3.7 Hietogramas puntuales de aguaceros de diseño con curvas Intensidad - Duración - Frecuencia .....	66
3.8 Hietogramas de los aguaceros especiales .....	67
3.9 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) .....	67
3.9.1 IDF con datos históricos precipitación.....	68
3.9.2 IDF por método simplificado .....	69
Referencias .....	70
<b>CAPÍTULO 4. ESTADÍSTICA EN HIDROLOGÍA .....</b>	<b>73</b>
4.1 Presentación y análisis de datos .....	73
4.2 Distribuciones de probabilidad de interés en hidrología.....	74
4.2.1 Normal o Gauss .....	75
4.2.2 Log-normal .....	77
4.2.3 Gumbelo valores extremos.....	81
4.2.4 Log-Gumbel.....	83
4.2.5 Distribución log-Pearson tipo III .....	84
4.2.6 Distribución Pearson tipo III.....	85
4.2.7 Distribución Wakeby .....	86
4.3 Pruebas de bondad y ajuste.....	87
4.4 Frecuencia de lluvias.....	88
4.4.1 Frecuencia de lluvias totales anuales .....	88
4.4.2 Frecuencia de lluvias máximas anuales .....	89
Referencias .....	90

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico desde los componentes de la escorrentía.....	6
Figura 2. Ciclo hidrológico.....	7
Figura 3. Aplicaciones de la hidrología.....	11
Figura 4. Variables consideradas en la aplicabilidad de consolidación medible del vapor de agua troposférico .....	14
Figura 5. Aspectos por considerar en el proceso de la evaporación .....	18
Figura 6. Aspectos esenciales vinculados a las cuencas hidrográficas.....	25
Figura 7. Elementos que componen una cuenca hidrográfica .....	26
Figura 8. Aspectos del proceso dinámico del agua en las cuencas hidrográficas para la preservación del ecosistema.....	27
Figura 9. Factores que inciden para los cálculos del área de drenaje.....	31
Figura 10. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $K_c$ ).....	32
Figura 11. Fórmula de la hoya.....	34
Figura 12. Clasificación de las corrientes de agua según orden. ....	35
Figura 13. Clasificación de las corrientes de agua en forma ramificada.....	35
Figura 14. Densidad de drenaje .....	36
Figura 15. Representación de la sinuosidad de la corriente de agua.....	37
Figura 16. Subsistemas de los SIG .....	38



Figura 17. Características de los SIG.....	39
Figura 18. Características físicas del <i>software</i> de los SIG.....	40
Figura 19. Ciclo hidrológico.....	46
Figura 20. Los tipos de precipitaciones basadas en la intensidad en un determinado tiempo .....	47
Figura 21. Formación de la precipitación a partir de factores externos .....	48
Figura 22. Tipos de precipitaciones.....	50
Figura 23. Determinación de los valores anual medio, media mensual y diarias, puntuales en el mes y el año.....	53
Figura 24. Promedio mensual de lluvia en bureta.....	54
Figura 25. Método Thiessen para el cálculo de la precipitación media.....	57
Figura 26. Ejemplo de los polígonos de Thiessen en la cuenca media del río Ranchería .....	58
Figura 27. Condiciones previas en la praxis del uso del método de polígonos de Thiessen .....	59
Figura 28. Método de las Isoyetas para el cálculo de la precipitación media .....	60
Figura 29. Pasos por seguir para construir las curvas de la IDF en una estación de tormentas .....	66
Figura 30. Diagrama de Gauss .....	75
Figura 31. Fórmula de distribución normal.....	75
Figura 32. Fórmula transformada distribución normal .....	76
Figura 33. Fórmula log-normal.....	77
Figura 34. Distribución log-normal.....	77
Figura 35. Características significativas de la distribución log-normal.....	78
Figura 36. Propiedades de la distribución de frecuencia log-normal .....	79
Figura 37. Comparación entre una distribución normal y una log-normal con los mismos percentiles del 5 % y 50 % .....	80
Figura 38. Consideraciones que deben ser asumidas antes de seleccionar la distribución más adecuada al caso hidrológico .....	81

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Recorrido histórico de la hidrología.....	2
Tabla 2.	Los diferentes modelos hidrológicos, categorías y descripción.....	8
Tabla 3.	Los modelos hidrológicos en función a las cualidades, funciones y clasificación. ....	9
Tabla 4.	Facetas de una cuenca hidrográfica.....	24
Tabla 5.	Función esencial de una cuenca de drenaje.....	28
Tabla 6.	Cuantificación porcentual del agua distribuida en el planeta .....	30
Tabla 7.	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) y su clasificación.....	33



## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN A LA HIDROLOGÍA Y SUS APLICACIONES

La hidrología ha tenido un recorrido evolutivo de gran interés en el mundo globalizado, en especial, sobre la especie humana, vegetal y animal. Todas las circunstancias del proceso dinámico del agua vienen a ser de gran relevancia para la humanidad.

Por otra parte, la esencia garantista hacia la humanidad son las propiedades y cualidades que puede dar la hidrología como baluarte del hombre, siendo la base para el logro del bien tutelado por los estados de la vida. Así, García Sánchez *et al.* (2015) expresan que en pleno siglo XXI la ética es primordial en cuanto a temas relacionados con el agua, ya que ha habido debates cuyos resultados establecen que este aspecto es un derecho fundamental y social, pues se vincula con la humanidad y, por lo tanto, debe estar por encima de los intereses materialistas.

Por ello, se hace necesario que el estudiante conozca el recorrido que ha tenido la evolución del agua como dinámica y movimiento, un proceso cíclico que se origina según algunos autores como Trevizan (2011) en la evaporación (esto se verá más adelante). Pues, al observar el desarrollo evolucionario, se puede inferir qué tan importante es determinar los valores del proceso hidrológico, la razón para seguir investigando sobre la hidrología y sus aplicaciones. A continuación, se muestran en la Tabla 1 los autores, años y situaciones sobre cómo ha evolucionado la hidrología; un aspecto necesario que todo estudiante de ingeniería debe saber y conocer, en especial lo actual, en cuanto al progreso e importancia de esta ciencia en la vida profesional de quienes abren brechas en el mundo de la ingeniería.

**Tabla 1. Recorrido histórico de la hidrología**

Nº	Autor	Año	Situación
1	Palissy, Bernard	1510-1589	Se observó que el origen de la hidrología parte de los ríos y manantiales, a través de la infiltración de la lluvia y comprensión del ciclo hidrológico.
2	-----	S. XVI y XVIII	Periodo de medida, pues se desarrolló el pluviógrafo como cubeta basculante y el correntómetro.
3	Perrault, Pierre	1608-1680	Parte de la medición de la escorrentía.
4	Bernoulli-Chézy	1690-1699	Medición y experimentación de la hidráulica. Teorema y piezómetro de Bernoulli. Fórmula de Chézy.
5	_____	S. XIX	
6	Dalton	1802	Tomó en consideración el principio de la evaporación. Describió el ciclo del agua basado en las observaciones de años pasados.
7	Hagen-Poiseulle	1839	Teoría del flujo capilar.
8	Mulvaney	1850	Método racional sobre crecientes máximas.
9	Darcy	1856	Ley de flujo en medios porosos.
10	Rippl	1883	Diagrama para almacenamiento.
11	Manning	1891	El flujo de canales abiertos fue expuesto como una ecuación.
12	_____	S.XX	Hidrología cuantitativa, empirismo como fórmula de soluciones hidrológicas: Luego Análisis racional de información observada
13	Green y Ampt	1911	Modelo basado físicamente para infiltración
14	Hazen	1914-1930	Análisis de frecuencia para los máximos de creciente y requerimientos en el almacenamiento de agua. Uso de la estadística en hidrología.
15	Richards	1931	Ecuación del flujo no saturado.
16	Sherman	1932	Método de diagrama unitario para transformar la precipitación efectiva en escorrentía directa. Hidrograma unitario.
17	Horton y Theis	1933-1935	Teoría de la infiltración. Concepto hidráulico de pozos.
18	Horton	1945	Descripción cuenca de drenaje. Teoría infiltración de la lluvia.

N°	Autor	Año	Situación
19	Gumbel	1941	Propuso la ley del valor extremo para los estudios hidrológicos.
20	Bernard, E.A	1944	Meteorología y la hidrometeorología.
21	Einstein	1950	Análisis teórico sobre sedimentación.
22	Hurst	1951	Demostó que las observaciones hidrológicas funcionan en secuencias de valores, la cual persiste en la actualidad.
23	Rojas y Barra (2020)	2022	En el siglo XXI surge la denominado sociohidrología, una interdisciplina que estudia la coevolución de los ríos y las comunidades ribereñas, trabaja el riesgo, conciencia del riesgo, la preparación y resiliencia social-gobiernos locales mediante la planificación territorial, comunicacional y de gestión del riesgo.

Fuente: adaptado de Chow *et al.* (1994).

Como es de observarse, en la Tabla 1 se aprecia que, desde el siglo XVI, se dan los primeros pasos de la hidrología, pues los estudios realizados por Bernard, citado por Chow *et al.* (1994), muestran, para 1570, la situación de los ríos y manantiales formados a través de la lluvia, asunto que fue base para gestionar la evolución hidrológica mundial. Los siglos XVII y XVIII fueron una etapa de mediciones, cuya esencia estuvo en los primeros aparatos utilizados para obtener datos e hidrométricos. Luego, en el siglo XIX, aparecen las primeras leyes de la hidrología, en ellas se establecen normas que generan líneas de acción como el caso de Darcy en 1856 con la ley de flujo en medios porosos.

Sucesivamente, llega el siglo XX, periodo en el cual se observan avances interesantes como en el caso de la hidrología cuantitativa y la cualitativa, aparece el empirismo, los diferentes análisis racionales, la frecuencia y los teóricos de sedimentación, variedad de modelos de estudios, la aplicabilidad de la estadística, la germinación de teoría como la infiltración de la lluvia, propuestas de leyes como la del valor extremo para los estudios hidrológicos, meteorológicos e hidrometeorológicos y las diferentes demostraciones hidrológicas.

Por supuesto que la hidrología del siglo XXI ha permeado avances con mayor celeridad debido a los efectos y la aplicabilidad de las tecnologías y la alta gama de complejidad y estadísticas digitales en tiempo real que facilitan cálculos predecibles para la protección de la humanidad. Los estudios hidrodinámicos y las teorías de transferencia en diferentes escenarios permitieron generar estudios de envergadura hidrológicos sobre la dinámica de la humedad de suelos, entre otros avances. A nivel mundial hubo proyectos arquitectónicos e industriales de gran dilación, tanto privados como públicos para la humanidad.

Para dar una contextualización a este capítulo es necesario mencionar varios puntos en el contexto de la hidrología: el ciclo hidrológico, el modelo del sistema hidrológico, la clasificación de los modelos hidrológicos, las aplicaciones de la hidrología, las definiciones de circulación atmosférica, el vapor de agua, la precipitación, la lluvia y la evaporación.

## 1.1 El ciclo hidrológico

En el mundo globalizado, y en especial en la ingeniería civil, se observa cómo la hidrología entra a formar parte de la ciencia que conforma una dimensionalidad amplia de las aguas y su ciclo. La hidrología como ciencia busca mantener el estudio de las aguas a niveles permisibles de optimización dentro del ciclo hidrológico (Méndez *et al.*, 2007). Se infiere que la hidrología, históricamente, presenta avances en el siglo XXI y su desarrollo está dirigido hacia la optimización del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico se conoce como aquel proceso mediante el cual se estudian las diferentes fases por donde el agua se traslada y cambia en sus estados, desde las continuas o de escorrentías que buscan establecer sus estados de estabilidad (Trevizan, 2011).

Al respecto, Guevara (2015) señala que el ciclo hidrológico representa el movimiento del agua en los canales naturales por donde puede filtrarse hacia lo subterráneo como fuente de escorrentía superficial. Esta apreciación se infiere en la descripción del alcance de la hidrología, la cual va permeando desde la precipitación del agua hasta los océanos en fases cumplidas como la evaporación, precipitación y transpiración, es decir, la llamada escorrentía superficial y agua subterránea.

En ese sentido, el ciclo hidrológico no es más que un proceso continuo y sin fin del agua existente en el globo terráqueo. Así pues, se plantean tres fases o estados, entre ellos el sólido, líquido y gaseoso, cuya existencia está ubicada en su mayor parte en los océanos, mares, ríos y nubes (Guevara, 2015). Se mantiene un constante proceso de forma variable del líquido desde la lluvia al precipitarse (zona de descarga) hasta evaporarse en el suelo manteniéndose en invariable circulación; incluso al solidificarse y convertirse en hielo.

De allí que el ciclo hidrológico se halla cuando, desde un proceso físico en el interior del globo terráqueo, el agua sufre transformaciones combinándose con lo externo, es decir, pasa a zonas de subducciones que luego atraviesa para llegar al manto. Esto conlleva a inferir que, siendo así dicho proceso en cantidad de variaciones producto de la dinámica del agua en las diferentes facetas como la superficie, el subsuelo terrestre, los océanos, mares y la misma atmósfera, se generan cambios significativos en cada fase.

Este ha sido un proceso de millones de años, donde el ciclo hidrológico inicia con la evaporación, luego al enfriarse se condensa, posteriormente, pasa a la fase de precipitación que cae a la superficie en forma de lluvia, pasando por la escorrentía y sus componentes, y así termina una parte del aprovechamiento del agua en forma líquida por parte del hombre.

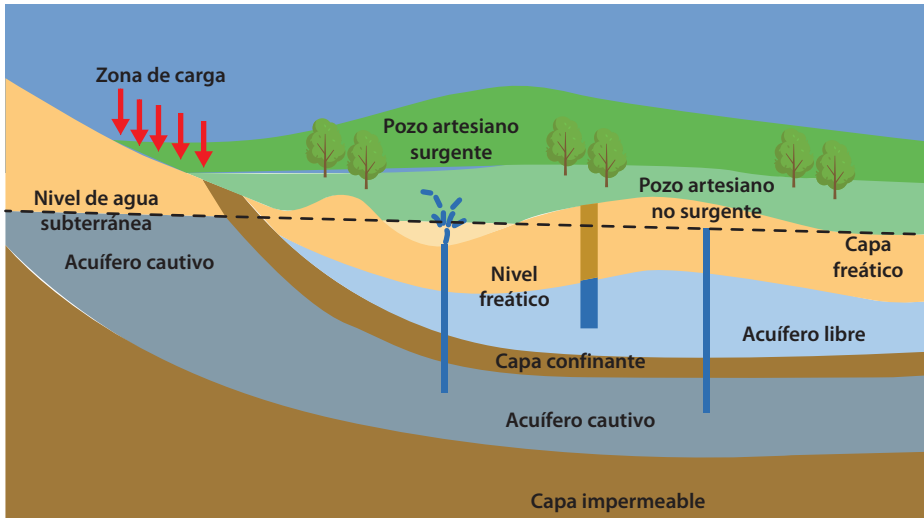
El ciclo hidrológico se caracteriza por ser un proceso de precipitación que permite al agua en forma de lluvia arrastrar sales hacia un proceso conocido como lixiviado y así continuar con el ciclo nuevamente. No obstante, y tomando las perspectivas del desarrollo y avance del control del agua, bien por arrastre, escorrentía u otras formas a través de la hidrología y su ciclo, no es menos cierto que el mañana será producto de lo que hoy se hace en beneficio de la humanidad. Miracle (2016) menciona que el agua es potencialmente beneficiosa a razón del aprovechamiento urbano, industrial y de otras formas de uso innovador, donde la tecnología de vanguardia permite el tratamiento mediante técnicas adecuadas de control en el ciclo hidrológico.

Sin embargo, existen elementos o componentes formadores dentro del ciclo hidrológico que permiten construir el camino del agua, bien por la escorrentía como primer paso generado en el ciclo hidrológico.

Como es de observarse en la Figura 1, los componentes de la escorrentía tienen sus propios elementos: cuando inicia en la descarga, pasando por las laderas con inclinación escorrentía en los pozos artesiano surgente y no surgente, hacia los niveles bajos y, entre ellos, el nivel de agua y el nivel freático. Luego se presentan los acuíferos cautivo y libre hasta establecer las capas freática, confinante e impermeable.



**Figura 1. Ciclo hidrológico desde los componentes de la escorrentía**

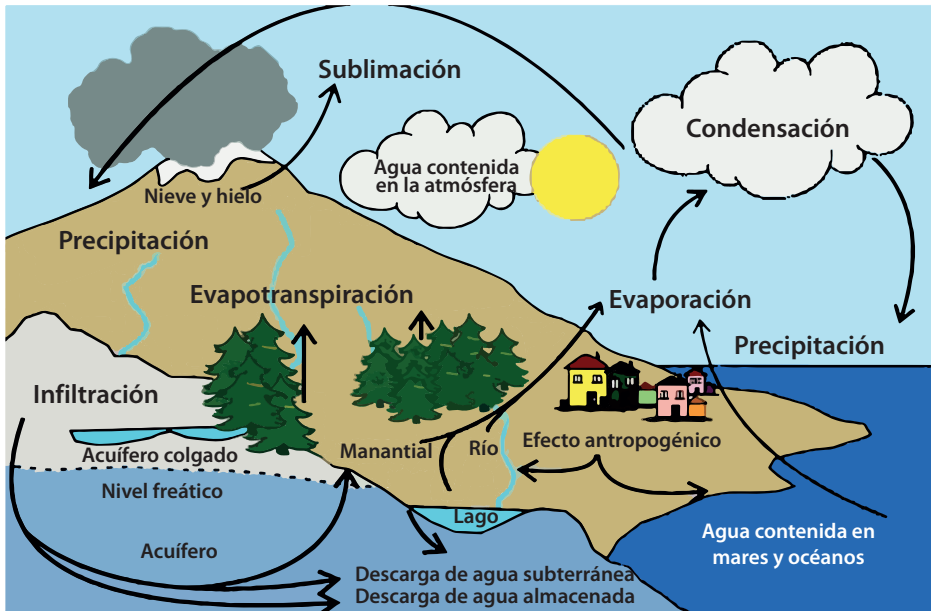


Fuente: Quiñones (2017, diapositiva 11).

Igualmente, se aprecia que la escorrentía permite dos fases: una es el aprovechamiento por los seres vivos y la vegetación, la otra es el proceso que deja llegar las aguas a los acuíferos para la formación de ríos, mares y aguas oceánicas. Los espacios acuíferos, llamados también como la percolación, continúan la dinámica y movimiento del agua de manera sucesiva volviendo a la atmósfera por masas de agua distribuidas como al inicio del ciclo.

Según Trevizan (2011) el agua es dinámica en su proceso natural, sus propiedades le permiten la sinergia en sus estados, es decir, sólido a líquido y gaseoso y viceversa; dado que su movimiento dinámico en el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación, pasando por la condensación, luego a la precipitación. Esto se expresa en la Figura 2.

Figura 2. Ciclo hidrológico



Fuente: de Miguel *et al.* (2009, p. 79).

Cuando se observa la Figura 2, se aprecia que el ciclo, efectivamente, cumple varias fases en la dinámica circulante de masas de agua bajo el efecto de “flujo energético”: una serie de pasos interrelacionados desde la evaporación (el proceso pasa de un estado del agua en fase líquida a vapor de agua). Luego transcurre el grado de humedad en cien por ciento al aire que pasa desde el punto de saturación hasta llegar a la condensación, es decir, el paso de vapor de agua del aire transformado en agua líquida hasta las denominadas nubes, después se generan las precipitaciones por efectos de la presión y temperatura desde las aguas superficiales y subterráneas (Pulido Bosch, 2007).

Lo antes comentado representa en hidrología un ciclo continuo bajo los efectos del proceso dinámico, cuyo origen proviene de los acuíferos y que por efectos de gravedad cae a las zonas subterráneas. Participa en este proceso el potencial hidráulico, la relación del agua superficial con aportes que genera el ser humano, el reino animal y vegetal.

Al respecto, Toledo (2006) considera que el agua, como elemento primordial por el tiempo de los procesos y movimientos a los que está sometida en la ciencia de la hidrología, también forma parte de la vida humana y da lugar al uso y mantenimiento de los ríos, a sus intervenciones y a su adaptación a las necesidades como la construcción de presas, el aprovechamiento de los acuíferos y el proceso de condensación y precipitación como forma de industria del agua.

## 1.2 Modelo del sistema hidrológico

El sistema hidrológico conocido por Chow *et al.* (1994), se concibe como aquel intercambio de etapas que genera una serie de pasos de forma sistemática, por ello, un sistema hidrológico presenta un modelo dimensionado y da cabida a seguir un patrón de forma global.

De esta manera, se puede apreciar que “el objetivo del análisis del sistema hidrológico no es más que estudiar la operación del sistema y predecir su salida” (Chow *et al.*, 1994, p. 8). Explican los autores que debe considerarse como un sistema real de entrada y salida, pues las variables a considerar desde la óptica hidrológica en sus estructuras son tomadas en un conjunto de ecuaciones efectivas, las cuales “conectan las entradas y las salidas”, en el proceso (Chow *et al.*, 1994).

Al entrar en aspectos de funciones, debe considerarse como en su eje central la transformación del sistema. No obstante, este sistema se configura a través de funciones de tiempo,  $l(t)$  y  $Q(t)$ , siendo  $t$  el rango de tiempo  $T$  (Chow *et al.*, 1994).

Entonces el sistema se puede representar como:  $Q(t) = \Omega l(t)$ , conocida por Chow *et al.* (1994) como la ecuación de transformación del sistema. Siguiendo el contexto de los autores, en la ecuación el símbolo  $\Omega$  (operador algebraico) es una función de transferencia, la cual significa la ubicación de la entrada y la salida. Si  $Q(t) = Cl(t)$ , donde  $C$  es una constante, entonces la función de transferencia es el operador  $\Omega = Q(t)/l(t) = C$ . En caso de que la operación sea descrita por una ecuación diferencial, la función de transferencia puede emplearse como operador diferencial.

## 1.3 Clasificación modelos hidrológicos

La clasificación de los modelos hidrológicos se explana en dos categorías según Chow *et al.* (1994) en la Tabla 2.

**Tabla 2. Los diferentes modelos hidrológicos, categorías y descripción**

Modelos	Categorías	Descripción
Físicos	Basado en escalas reducidas	a. Modelo hidráulico de una presa. b. Modelo análogo (ejemplo: Hele-Shaw, aquel cuya esencia es el movimiento fluido viscoso entre dos placas paralelas, son diseñados en acuíferos, allí modela el flujo requerido).
Abstractos	Basado en el sistema matemático	Se describe por medio de un conjunto de ecuaciones. En ellas se plantean variables tanto de entrada como de salida, es decir, funciones de espacio y tiempo, muy dadas a las probabilísticas o aleatorias. Los modelos hidrológicos se basan en un proceso simplificado.

Dado el razonamiento de estos modelos, se explica una serie de dimensionalidades producto del papel que juegan las variables en el proceso simplificado del recurso hídrico. Siendo así, Chow *et al.* (1994) mencionan, a diferencia de la Tabla 2, los dos modelos en función de las cualidades y funciones de la hidrología en la Tabla 3.

**Tabla 3. Los modelos hidrológicos en función a las cualidades, funciones y clasificación**

Modelo	Cualidades	Funciones	Clasificación
Determinístico	No considera la aleatoriedad. Se hacen pronósticos.	Una entrada produce una misma salida. Flujo permanente (tasa de flujo invariable) y no permanente.	<i>Agregado:</i> promediado en el espacio como único punto. <i>Distribuido:</i> promediado en varios espacios y puntos. Sus funciones generan dimensiones espaciales.
Estocástico	Apropiado para variación aleatoria grande. La parcial aleatoriedad se da cuando la salida real es diferente a la razón del valor único producido desde lo determinístico. Se hacen predicciones.	Una salida por lo menos es parcialmente aleatoria. Ejemplo: modelos de precipitaciones diarias.	<i>Independiente:</i> generado en el espacio y tiempo. <i>Correlacionados:</i> se genera en diferentes puntos del espacio.

Fuente: adaptado de Chow *et al.* (1994).

Se infiere que ambos modelos son de aplicabilidad en la hidrología y que en la contemporaneidad juegan roles variados a razón de sus cualidades y funciones dentro de la hidrología. Con el método determinístico son esenciales los procesos de pronósticos, dado que el estocástico tiende a las predicciones, en virtud de la aleatoriedad.

## 1.4 Aplicaciones de la hidrología

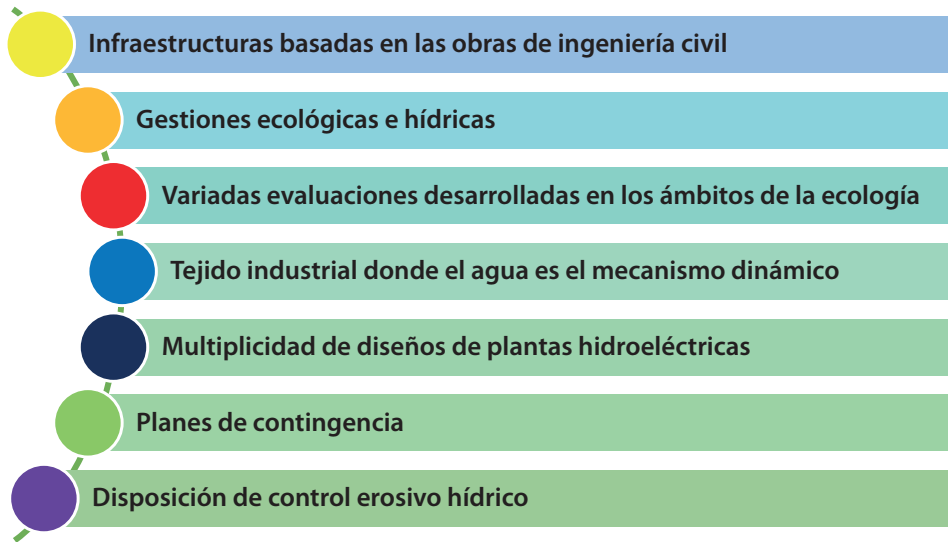
La hidrología como ciencia ha tenido un rol importante en la humanidad, en especial, cuando se proyectan infraestructuras de gran dilación e importancia, además de predecir eventos en la protección de la humanidad (Guevara, 2015). En el recorrido histórico se apreció cómo esta ciencia ha evolucionado y manifestado sus fortalezas, por ello posee numerosas aplicaciones en el mundo contemporáneo,

permeando la interdimensionalidad de otras ciencias como la física, química, mecánica de fluidos, por mencionar algunas, direccionadas al preciado fluido denominado agua.

Guevara (2015) permite estudiar la hidrología como ciencia, la cual contempla una serie de variables que se conjugan en los eventos para sus diferentes aplicaciones, desde el punto de vista del mundo ingenieril:

- a. “Elementos de estadística aplicada a la hidrología”, fundamentalmente, en los análisis hidrológicos para la estimación de crecidas;
- b. diferentes “Métodos hidrológicos para el análisis de la información pluviométrica”, en especial, las precipitaciones máximas probables;
- c. “Métodos hidrológicos para el análisis de la información hidrométrica”, caso de hidrogramas unitarios, estimaciones de caudales pico, análisis hidrológicos regionales, entre otros;
- d. “Métodos para el análisis sedimentológico”, entre ellos la producción anual de sedimentos en una cuenca, por nombrar alguno;
- e. “Métodos hidrológicos para el análisis de sequías”;
- f. “Monitoreo de variables hidrológicas ambientales”, fundamentalmente, los diseños de redes hidrometeorológicas y la aplicabilidad de los métodos de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), de Huff, de Langbein, el uso de satélites meteorológicos geoestacionarios, entre otros;
- g. los estudios de las aguas subterráneas, las fluctuaciones de los niveles freáticos, aplicación de la ley de Darcy, la permeabilidad de los suelos, los balances de las aguas subterráneas, entre otros;
- h. un interesante motivo permanente en cuanto a la aplicabilidad de métodos para el control del impacto ambiental de las obras hidráulicas, en especial, cuando se trata de grandes infraestructuras regionales;
- i. la calidad del agua para consumo humano, tanto domiciliario, urbano e industrial, toda vez que sea destinada para fines variados, es decir, agropecuarios, industriales, para la generación de energía hidroeléctrica y riegos a grandes escalas, por nombrar algunos.

En fin, existe una gran variedad de aplicaciones donde interviene la hidrología. También Martínez y Villalejo (2018) han señalado que puede direccionarse hacia los ámbitos reflejados en la Figura 3.

**Figura 3. Aplicaciones de la hidrología**

Fuente: adaptado de Martínez y Villalejo (2018).

Como es de observarse en la Figura 3, la hidrología tiene y ha tenido diferentes aplicaciones. Se evidencia en los estudios basados en análisis, métodos, planes de vanguardia y movimientos donde lo hídrico es preeminente. Las diferentes disposiciones existentes en las obras de ingeniería civil, entre otros estudios, son de primordial atención en la dinámica del fluido más relevante y necesario de la humanidad: el agua como recurso hídrico.

No obstante, los autores Martínez y Villalejo (2018) reflejan los aspectos integradores para una aplicabilidad asertiva de la hidrología, entre esos aspectos a considerar están: infraestructura, gestión hídrica, ecología, industria, plantas hidroeléctricas, planes de contingencia y, por si fuera poco, el control erosivo desde la óptica hídrica.

## 1.5 Definiciones

### 1.5.1 Circulación atmosférica

La climatología inmersa en la geofísica parte de la esencia de la aplicabilidad de teorías y técnicas que permean la meteorología, aquella que se fundamenta en el registro de datos de superficie y altura sobre mediciones del flujo atmosférico (Correa *et al.*, 2009). En función de eventos remotos de la naturaleza, existe una serie de eventos predecibles, por decirlo de alguna manera, que pueden afectar naciones y ocasionar devastaciones por el control de la circulación atmosférica.

Por tal razón, se hace evidente la búsqueda de datos que permitan obtener las características de la circulación atmosférica definida como el proceso mediante el cual se dinamiza el control del mecanismo espiral del flujo atmosférico, sabiéndose que estos circundan la atmósfera del globo terráqueo (Correa *et al.*, 2009).

Evidentemente, se requiere de un tejido de métodos que facilite obtener datos en tiempo real de la climatología moderna en función de los procesos meteorológicos y, por qué no, de las corrientes planetarias en la circulación atmosférica.

Entre otros elementos que emergen de la circulación atmosférica, se encuentran: vientos planetarios, calentamiento y presión global, ubicación continental y oceánica, rotación de la tierra (Poveda *et al.*, 1998). Estos autores expresan que la circulación atmosférica es toda una dinámica de vientos, específicamente, en las zonas de convergencia tropical e intertropical, seguido de los procesos atmosféricos circulares, cuya tendencia está en función de las células Hadley, Ferrel o Polar, a la transferencia de energía.

Al respecto, Correa *et al.* (2009) plantean que las presiones atmosféricas son un asunto donde la teoría hidrodinámica debe ser baluarte en conocimiento y gestión, debido al uso de métodos sobre predicciones en cuanto a la circulación atmosférica y los diferentes eventos transmitidos por los intercambios en el equilibrio de la temperatura, humedad, entre otros indicadores.

De la misma manera, se evidencia la necesidad que tienen los gobiernos de mantener el control de la circulación atmosférica, aquella cuya cualidad está en el devenir de los vientos, la cual sin estos no habría vida. Pues, desde la óptica meteorológica, sería intolerable por muchas razones, primeramente, por la toxicidad, el calor intenso o el frío insoportable, o por las tormentas o eventos naturales como ciclones, tsunamis, tornados entre otros.

Mencionan Correa *et al.* (2009) que los flujos térmicos atmosféricos son de cuidado, dado que los mecanismos y dinámicas atmosféricas en el control del vapor de agua, precipitaciones, lluvias, evaporación y, por si fuera poco, los procesos de circulación atmosférica.

### **1.5.2 Vapor de agua**

El ciclo hidrológico en el proceso natural representa el agua en sus diferentes caminos entre la atmósfera y el suelo. Se evidencia que la evaporación es parte de este evento. Entonces la evaporación como proceso dinámico del ciclo hidrológico converge a razón de enviar el agua a la atmósfera a través del vapor de agua.

Según Ruiz *et al.* (2012) y Martínez (2007) el vapor de agua en su interacción es de gran interés en el proceso dinámico, puesto que a través del medio atmosférico este no se encuentra distribuido homogéneamente en la atmósfera. Esto permite

que el vapor de agua se rija por patrones, cuyas variables son temperatura, vientos y evaporación. La articulación de estos tres elementos depende en gran parte del promedio de evaporación y precipitaciones y, por su alta complejidad, requiere de las correlaciones interdisciplinarias.

Aquí, desde la óptica atmosférica, entra a jugar un rol importante en la evaporación el denominado vapor de agua, debido a su invisibilidad por sus microscópicas moléculas agitadas en aguas marinas, oceánicas, ríos, lagos, entre otros, y que pasan de forma líquida a vapor para subir en busca de la condensación, efecto que se produce en ambientes abiertos de la naturaleza.

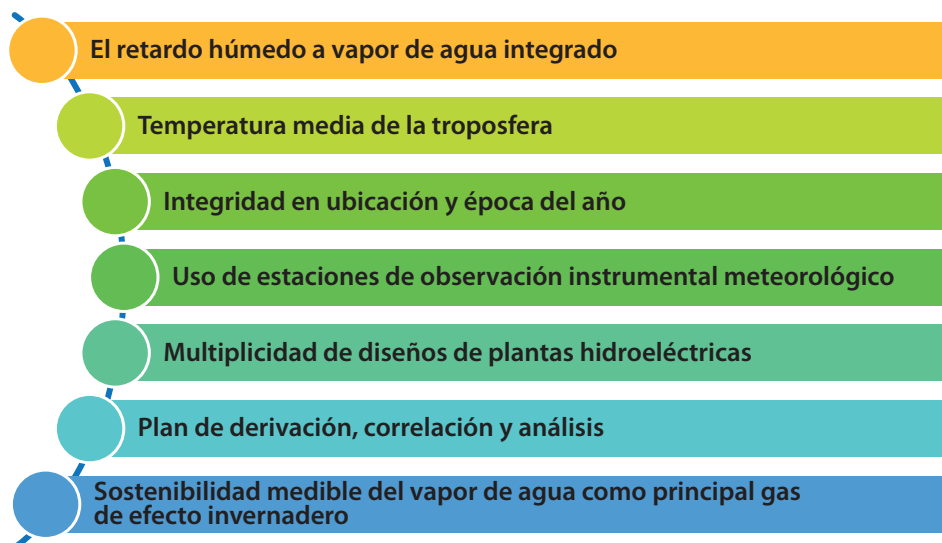
En un análisis realizado a la investigación elaborada por Cioce *et al.* (2011) sobre la determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones, se explica que, efectivamente, el cálculo del vapor de agua está inmerso en la modalidad cuantitativa, pero, más allá de toda intención, está el hecho de que el vapor de agua troposférico puede ser medible, así se realizó en un área específica de Venezuela con una consistencia interna de  $\pm 3\text{mm}$ .

En ese orden de ideas, el evento generó un proceso cuyo vapor de agua fue medible a través de intervalos de 30 minutos durante 46 días con resultados de  $\pm 0,88\text{kg}\cdot\text{m}^2$  (Cioce *et al.*, 2011). También señalan los autores que el uso de patrones de calidad externos da diferenciales medias en el orden de  $\pm 8\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ; se infiere que la estimación del Sistema de Posicionamiento Geográfico (GPS) puede darse con una recuperación del vapor de agua troposférico de manera efectiva, confiable y exacta.

A estos efectos de aplicabilidad de consolidación medible del vapor de agua troposférico se pueden sumar una serie de variables tales como las reflejadas en la Figura 4.



**Figura 4. Variables consideradas en la aplicabilidad de consolidación medible del vapor de agua troposférico**



Fuente: adaptado de Cioce *et al.* (2011).

Se observa que toda variable de estudio en un sistema hidrológico es de relevancia, puesto que trae consigo elementos susceptibles de estimación cuando se tratan de cuantificar. En el caso expuesto por Cioce *et al.* (2011) se permite identificar que existe una generación de estudios multidisciplinarios sobre tópicos ambientales que favorecen de alguna manera a los especialistas para indagar sobre el mundo de la hidrología y los aspectos determinantes del ciclo hidrológico.

### **1.5.3 Precipitación**

El ciclo hidrológico converge en varias etapas, que juegan roles importantes, donde la evaporación es la fase inicial y pasa a la condensación transformada en moléculas de agua suspendidas en las nubes.

Durante el proceso de las precipitaciones generado por efectos del valor de temperatura y por su peso específico, el agua cae o se desprende de la nube hasta llegar a la superficie. La precipitación puede darse en gotas de lluvia o, por efectos de los cumulonimbos, granizo; por lo tanto, se puede asumir que las bondades generan falencias o debilidades en su descuido.

En ese orden de ideas, se trae a colación un estudio elaborado por Ramos y Pacheco (2017) para ejemplificar un proceso de cálculo de precipitaciones, donde puede inferirse una serie de elementos que deben ser considerados cuando se está en presencia de las variables cuantificables de precipitaciones. En este estudio se

aprecia la formalización de reflexiones sobre las evaluaciones a precipitaciones, para ello se comenta lo siguiente:

- a. Para obtener resultados pluviométricos asertivos se hace necesario el uso de estaciones hidrometeorológicas, donde los datos reflejados en los histogramas y caudales bases sean confiables.
- b. Estudiar las condiciones hidráulicas de ríos donde deba utilizarse una modelación cuyo régimen de flujo sobre niveles de agua sea ideal y las cuencas jueguen un papel preponderante a razón de los perfiles de flujo.
- c. Hay condiciones hidrodinámicas relevantes a considerar en los eventos pluviométricos: velocidades generadas en los ríos, transporte de sedimentos, socavación máxima en profundidad, acción del caudal y curvas granulométricas.
- d. Conocer la aplicabilidad del método de la onda cinemática es de interés, pues permite optimizar las modelaciones hidrológicas en evaluación.
- e. La evaluación hidráulica de un río debe incorporar la movilidad de sedimentos fácticos: las erosiones propensas a riesgo sobre estructuras hidráulicas.

Todo lo antes comentado, permite inferir que es de interés ingenieril los estudios sobre las precipitaciones, conocer a nivel morfológico el todo en hidrología y sus niveles básicos, dado que de ello depende el cómo hacer, por ejemplo, una estructura hidráulica en un determinado lugar o un puente que favorezca a una población sin llegar a equivocaciones.

De la misma manera, Ordoñez (2011), cuando se refiere al ciclo hidrológico, enfoca su estudio al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico, comenta y reflexiona sobre la denominada precipitación.

Al respecto, Musy (2001, como se citó en Ordoñez, 2011) señala que la precipitación es:

[...] toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.) y sólida (nieve, granizo, etc.) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc.). Ellas son provocadas por un cambio de la temperatura o de la presión (p. 9).

Asumiendo el concepto de la precipitación, se infiere que esta integra el ciclo hidrológico y se une al sistema hidrológico continental (Musy, 2001, como se citó en Ordoñez, 2011). Pero, para obtener una precipitación, se requiere llegar a la condensación del vapor de agua atmosférico, previo a ello esta la saturación, bajo las diferentes presiones como la constante adiabática, vapor de agua, mezcla y turbulencia (Ordoñez, 2011).

Señala Ordoñez (2011) que las precipitaciones mencionadas se definen como: 1) convectiva, donde aplica el principio cumulonimbos, es tempestuosa, de lapso corto, intensa y extensión espacial mínima; 2) orográfica, se inclina hacia barreras topográficas, principio de altitud, su intensidad y frecuencia es considerada regular; y 3) frontal o ciclónica, aquella cuyo principio es de poca intensidad, con duración larga y gradiente térmico vertical con presencia de humedad.

Finalmente, se considera que la precipitación puede medirse en promedio anual, mensual y diariamente en milímetros o pulgadas. Tomando referencias medibles, la tendencia de una parte del agua que cae como precipitación o nieve siempre va a ser infiltrarse en el suelo y en acuíferos subterráneos en función de factores ambientales que intervengan en la variedad de cuerpos de agua.

### **1.5.4 Lluvia**

La lluvia representa la caída del agua en gran cantidad en forma de gotas y, como parte del proceso, genera la precipitación de las nubes a propósito del vapor de agua y de las denominadas gotas de nube (Ordoñez, 2011). Se infiere que una vez entran en el proceso de descondensación, por efectos del viento y del calor proporcionado, las gotas de mayor tamaño, lo suficientemente pesadas y por efectos gravitacionales, caen de la nube en forma de precipitación.

A estos efectos, la lluvia es parte de la constitución medible de las precipitaciones en un sistema métrico en milímetros y decimas de milímetro, es decir, que el principal componente cuantificable de las precipitaciones son las gotas de lluvia que son medibles en un determinado tiempo.

Por tal motivo, las precipitaciones entran a jugar roles medibles a razón de la caída de gotas de lluvia, para ello se hace uso de instrumentos registradores de forma acumulable o automatizados. La actividad pluviométrica debe hacerse con pluviómetros y la transmisión directa debe hacerse en la zona de interés para los análisis correspondientes (Ordoñez, 2011). En común asociación, el pluviómetro, como instrumento medible de la lluvia, debe tener varias condiciones: 1) boca del pluviómetro a 1.5 m del suelo; 2) sujeto por un soporte lateral; 3) desmontable con facilidad a razón de hacer asertiva la lectura.

En ese orden de ideas, el pluviógrafo, como se ha mencionado en el párrafo anterior, dimensiona el tiempo, lugar, cantidad e intensidad de la lluvia (Ordoñez, 2011). Existen aspectos que formalizan la elaboración de diseños y cualidades, entre ellas: a) flotador sin sifón automático; b) flotador con sifón automático; c) balanza y oscilación; d) cubeta basculante (este último es el más usado por su versatilidad). Entre otros, está el pluviógrafo de balanza separar encarga de pesar el agua o la nieve en una plataforma que presenta un resorte o báscula y cuyo registro es marcado en una carta de valores acumulados de precipitación.

Finalmente, se traen a colación los modelos de lluvia con los cuales se hacen cálculos en función de las precipitaciones, para ello, Aparicio (1992) refleja lo siguiente:

Los modelos de lluvia son métodos con los cuales se aíslan los factores significativos en el proceso de precipitación y se extrapolan hasta sus extremos probables, de tal manera que se tenga una idea razonable de la máxima precipitación que puede caer en una zona dado ciertas condiciones atmosféricas. Estos modelos son más aplicables a gran escala que a tormentas pequeñas, pues en las últimas los errores que inevitablemente se cometen en la estimación del flujo de humedad pueden llegar a ser considerables (p. 126).

Esta afirmación conlleva a significar la importancia que la lluvia presenta para el control de las precipitaciones, pues estas generan dos dimensiones: un plano inclinado y un plano convergente. El primero se refiere a la producción de precipitación en tormentas frontales mientras que el segundo verifica tormentas convectivas.

### **1.5.5 Evaporación**

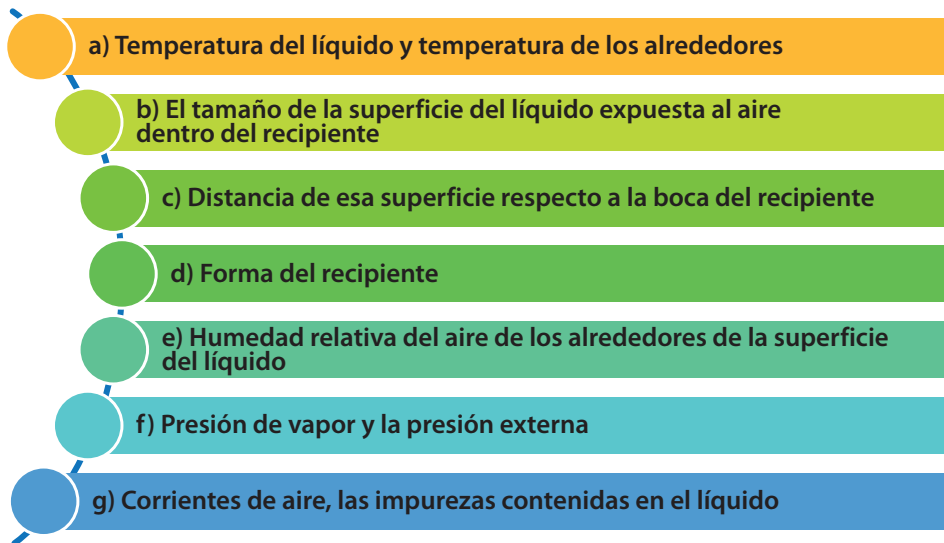
La evaporación, como proceso y parte del ciclo hidrológico, consiste en que el agua pase del estado líquido a gaseoso producido por efectos del calor natural proveniente del sol. En otras palabras, la evaporación del agua, como proceso físico, permite pasar de un estado líquido a un estado gaseoso o vapor de agua a través de una temperatura cuya gradación determina la saturación en el proceso de evaporación, pero que depende, obviamente, de la superficie del agua en la cual esté expuesta, además, del porcentaje de vapor existente.

En la Figura 5 se refleja una serie de cuestiones que hay que tener en cuenta cuando el agua se evapora, pues son los enlaces que mantienen unidas las moléculas con más energía y, cuando se rompen al aumentar la temperatura del agua, estos enlaces se reducen. La evaporación puede considerarse como un proceso por el que el agua pasa de estado líquido a gaseoso, entrando en la atmósfera en forma de vapor y volviendo así, gradualmente, a su ciclo original. Sin embargo, puede explicarse por el hecho de que el 90-90% de la evaporación procede de la humedad atmosférica y el resto se produce por la transpiración de las plantas. El proceso de evaporación se produce por el efecto del calor que rompe los enlaces moleculares en el agua que hierve a cien grados Celsius o doscientos doce grados Fahrenheit.

Al respecto, Manzur y Cardoso (2015) expresan que “la evaporación de cualquier líquido depende de muchos factores” (p. 32). Los autores hacen referencias a los aspectos reflejados en la Figura 5.

### 1.5.4 Lluvia

Figura 5. Aspectos por considerar en el proceso de la evaporación



Fuente: elaboración propia con base en datos de Manzur y Cardoso (2015, p. 32).

En concordancia a la evaporación como proceso y el vapor de agua un mecanismo, conlleva a considerar que esta es la etapa principal, dado que los océanos cubren un 70 % de la superficie a gran escala, pero lo evaporado cae nuevamente a la superficie a través de la precipitación (con mayor cantidad en las aguas oceánicas).

En otro orden de ideas, y para hacer una ejemplificación de la participación de la evaporación, se trae a colación el análisis del experimento elaborado por Manzur y Cardoso (2015): el experimento mide la masa de agua evaporada; teniendo en cuenta el tiempo y la temperatura del entorno, se elaboraron las curvas de nivel de agua dentro de un recipiente. Los autores concluyen que el experimento puede ser utilizado por los estudiantes de ingeniería para repasar los conceptos de masa molecular y número de Avogadro, en los cuales se debe considerar la expresión de la tasa de evaporación en términos de moléculas evaporadas por unidad de tiempo y por unidad de superficie, ya que el resultado es un producto lineal de variables como:

- a. la geometría del recipiente;
- b. la tasa de evaporación y
- c. la medida dada en unidades de masa por unidad de tiempo y por unidad de superficie.

En definitiva, se puede expresar que este proceso de la evaporación concuerda con la concepción dada por Aparicio (1992), quien señala que la evaporación viene a ser aquella que:

[...] se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferenciales en presión de vapor (p. 47).

Significa en este proceso la presencia de la energía cinética en reacción al espectro molecular del agua, cuyo flujo de partículas se genera en la atmósfera, direccionado a la condensación, y luego se precipita en las cuencas. En la aplicabilidad de cálculo de la evaporación se adecua a la ecuación, la cual se formaliza en la cantidad de agua exportada a la zona de intercambio, tomando las presiones de vapor de este en combinación con la presión de vapor del aire, luego, relaciona la saturación bajo el cumplimiento de la ley de Dalton (Aparicio, 1992). Basados en la ecuación:  $E = k (e_s - e_a)$ , donde  $k$  es una constante de proporcionalidad y  $E$  es la evaporación,  $e_s$  representa la presión de vapor de saturación y  $e_a$  es la presión de vapor del aire; esta fórmula permite generar datos cuantitativos.

Finalmente, existen instrumentos de medición de la evaporación, y estos vienen a ser aquellos denominados evaporímetros, son recipientes con un nivel de agua adecuado, medibles por día, que toman la diferencial de cambio en función a la altura de evaporación midiendo la altura de precipitación registrada en un intervalo de tiempo en la estación pluviométrica. Se destaca el hecho de corrección multiplicando los valores registrados por un factor que varía entre 0.6 y 0.8, ciertamente, la media es 0.7 como buen valor, sin embargo, en la actualidad se han generado otras alternativas de medición en el mercado.

## Referencias

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa y Grupo Noriega Editores.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Cioce, V., Hoyer, M., Wildermann, E., Royero, G. y Díaz, A. (2011). Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones GPS: Primeros ensayos en Venezuela. *Interciencia*, 36(10), 721-730.
- Correa, M., Zuluaga, C., Palacio, C., Pérez, J. y Jiménez, J. (2009). Acoplamiento de la atmósfera libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. Caso de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. *Dyna*, 76(158), 17-27.
- De Miguel, A., Lado, J., Martínez, V., Leal, M. y García, R. (2009). El ciclo hidrológico: Experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(1), 78-85.
- García Sánchez, M. R., Godínez Alarcón, G., Pineda Avonza, B. y Reyes Añorve, J. (2015). Derecho al agua y calidad de vida. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 6(11), 758-772.
- Guevara, E. (2015). *Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales*. Autoridad Nacional del Agua.
- Manzur, A. y Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. *Revista Mexicana de Física E*, 61(1), 31-34.
- Martínez Arroyo, A. (2007). El agua en la atmósfera. *Ciencia*, 58(3), 36-44.
- Martínez Valdés, Y. y Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: Una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- Méndez, W., Córdova, J., Cartaya, S. y Pacheco, H. (2007). Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí. Estado Vargas, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 22(1), 5-20.
- Miracle Solé, M. R. (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. *Polis*, 5(14).

- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Balance hídrico superficial*. Sociedad Geográfica de Lima. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/variados/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/variados/balance_hidrico.pdf)
- Poveda, G., Gil, M. M. y Quiceno, N. (1998). El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 27(3), 721-731.
- Pulido Bosch, A. (2007). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos*. Editorial Universidad de Almería.
- Quiñones, A. (2017). *Escorrentía*. [Diapositiva PowerPoint]. <https://es.slideshare.net/alexandraquinones1422/escorrentia-79535908>
- Ramos Moreno, A. y Pacheco Fontalvo, J. A. (2017). Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Frío, municipios de Ciénaga y Zona bananera, departamento del Magdalena. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), 156-178. <https://doi.org/10.22335/rlct.v9i1.302>
- Ruiz, D., Martinson, D. G. y Vergara, W. (2011). Trends, stability and stress in the Colombian Central Andes. *Climatic Change*, 112(3-4), 717-732. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0228-0>
- Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. Instituto Nacional de Ecología.
- Trevizan Rispoli, J. F. (2011). Mirando sobre y bajo el agua. *Idesia*, 29(2), 169-174. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200022>





## CAPÍTULO 2

# LAS CUENCAS DE DRENAJE

### 2.1 Definición

En la actualidad las principales cuencas hidrográficas del mundo buscan ser aprovechadas bajo una óptima calidad y cantidad, pues siendo parte de ellas los bosques como recursos naturales, requieren de una buena gestión integrada y desarrollo planificado cuya necesidad del manejo de las aguas se apegue a los estudios morfológicos (Montoya y Montoya, 2009). Significa, según los autores, que deben hacerse estudios morfológicos de forma permanente para lograr el empuje industrial requerido para el mejoramiento del manejo de los recursos hídricos.

En ese sentido, una cuenca de drenaje es el área delimitada en la superficie de los bosques por los comportamientos morfodinámicos de los cursos de agua, cuyos factores cuantificables inciden en varias dimensiones, entre ellas, las precipitaciones pluviales dirigidas hacia los drenajes que son recolectadas desde los escurrimientos (Cruz *et al.*, 2015).

Obviamente, la superficie comentada debe ser parte de un drenaje natural, allí deben converger las aguas pluviales hacia la formación del sistema de drenajes o las llamadas afluentes, todo ello alimenta la principal ruta formadora de los caudales de los ríos. Se suma a esta concepción de cuenca hidrográfica en Colombia lo explanado a través del Decreto 1729 de 2002:

[...] área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

A tales efectos, estas cuencas, en función a sus condiciones físicas y adaptadas por la superficie, son insidiadas por el clima y tipos de suelo limitadas por su estado natural y la estructura vegetal que presenten, razón permisible de imbricar la comprensión e interpretación del drenaje siendo, por lo tanto, cuantificable desde la óptica de las dimensionalidades.

De la misma forma, expresan Rojo (1997) y Montoya y Montoya (2009) que una cuenca hidrográfica presenta una serie de facetas referidas en la Tabla 4.

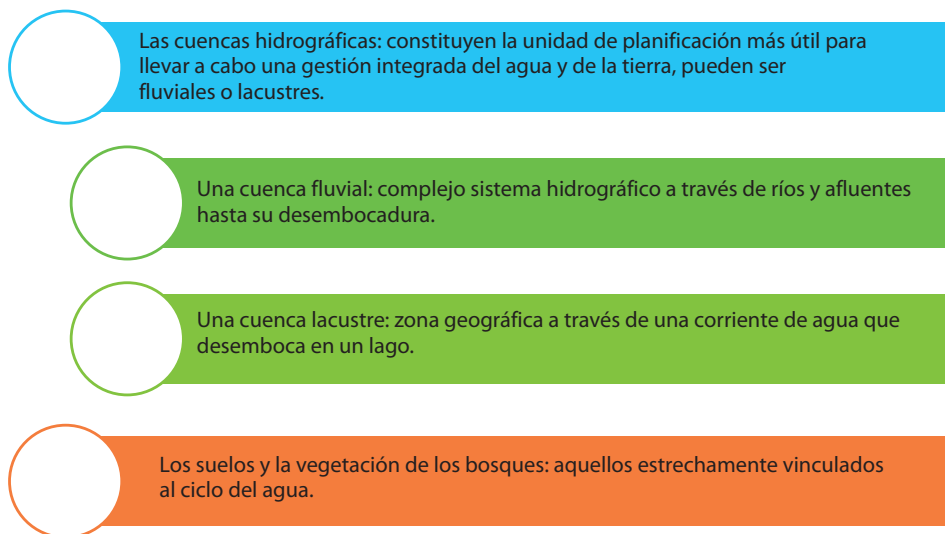
**Tabla 4. Facetas de una cuenca hidrográfica**

<b>Facetas de las cuencas hidrográficas</b>	
a.	Es parte de un conjunto de ríos, la cual el flujo de agua se conduce hacia un cauce principal.
b.	Presenta una red de drenaje de aguas que escurre por toda ella hasta llegar a formar la red de canales.
c.	El perímetro de una cuenca es la línea curvada y accidentada que recorre la divisoria de aguas entre las cuencas adyacentes.
d.	El tejido cognitivo morfométrico de una cuenca facilita la planificación y manejo desde la praxis de ingeniería.
e.	Los estudios morfológicos de una cuenca son vitales cuando se conocen los caudales del cauce principal, tamaño, pendiente y el área de la cuenca.
f.	La escorrentía es la fluidez de aguas de superficie de suelo a causa de precipitaciones pluviales, cuyo desplazamiento va por pendiente hacia puntos de menor cota como consecuencia de la gravedad, es decir, en términos coloquiales, aguas abajo.
g.	La escorrentía permite la permeabilidad de aguas por superficie de suelo, la cual va a un mismo punto de salida.

Fuente: adaptado de Rojo (1997) y Montoya y Montoya (2009).

Como es de observarse en la Tabla 4, las facetas de las cuencas hidrográficas inciden en la morfología desde la concepción estadística o cuantitativa en la medida que se conozcan los datos de las dimensionalidades, de esa forma se puede llegar al término final de una planificación y manejo en la praxis ingenieril de los recursos hídricos.

Otra concepción de la cuenca hidrográfica es dada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, s.f.), la cual expresa que es un área geográfica drenada por una fuente de agua. Este concepto se aplica a varios niveles, desde áreas de escorrentía agrícola hasta grandes cuencas hidrográficas. Significa que son aguas que corren hacia abajo por canales naturales, entre ellas se pueden mencionar aspectos esenciales vinculados (Figura 6).

**Figura 6. Aspectos esenciales vinculados a las cuencas hidrográficas**

Fuente: adaptado de Braz (2020).

En ese sentido, y tomando en consideración los aspectos que menciona la FAO respecto a las cuencas hidrográficas fluviales y lacustres, también se vinculan el suelo y la vegetación en las cuencas.

Por otro lado, Ven Te Chow y Monsalve, citados por Gutiérrez (2014), son del criterio de que una cuenca hidrográfica representa aquella superficie topográfica de tierra mediante la cual recibe y deja drenar los cursos de aguas hacia una corriente determinada, es decir, aquellas afluentes empalmadas a un sistema interconectado cuantitativamente a los caudales que pudiesen presentar efluentes y descargables a las vertientes, bien sean superficiales o subterráneas, realizables a través de salidas como los son las cuencas fluviales o lacustres.

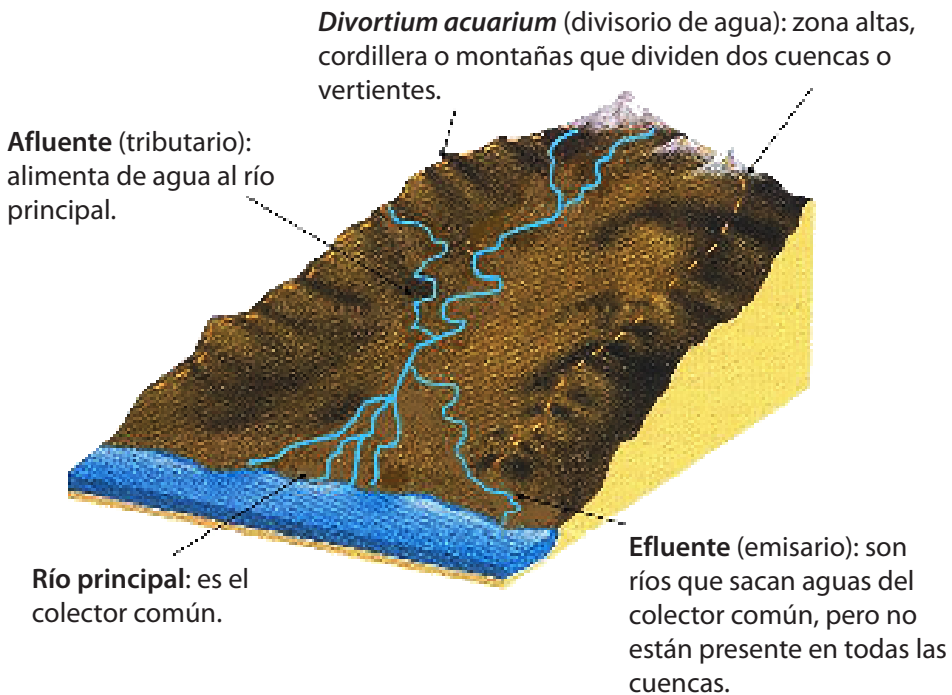
Asimismo, en estas cuencas se observan los elementos que las componen desde las cordilleras y valles. Allí se aprecian las afluentes que alimentan los ríos y la divisoria de las aguas (*divortium acuarium*) ubicada en las zonas altas, bien sea montañas o cordilleras, drenando a través de la formación de la cuenca o las vertientes de agua producto de la topografía y de la superficie. Luego termina en los efluentes que son salidas hacia emisarios o colectores comunes, aunque no necesariamente estén presentes en todas las cuencas, y, finalmente, la formación de ríos que son el principal colector común de todos los afluentes.

Por ello, la cuenca hidrográfica siempre estará determinada por la divisora de las aguas, la cual nace desde las altas montañas, por sus caudales en pendiente, que llegan a aguas abajo a través de suelos, y las diferentes vegetaciones de los afluentes; posteriormente, se convertirán en las cuencas propiamente dichas en la formación

de ríos e incluso siendo emisores hacia colectores comunes según los afluentes constituidos. Se hace destacar el hecho de que los ríos, como parte constitutiva del sistema de circulación de fluidos y sedimentos hacia las cuencas hidrográficas, permiten de alguna manera la dinámica hidrológica en superficie terrestre que al fin y al cabo se interconecta en el proceso de transporte hacia los conos aluviales, fluviales, deltanos, entre otros (Campoblanco y Gomero, 2000).

Pero no se debe dejar de lado el contexto de los ríos, esa dinámica en la que confluyen en el ciclo hidrológico del agua, pues dicho proceso es parte del ecosistema poblacional mundial. Tal como lo señala Camargo (2005), el agua y su proceso, en especial las cuencas hidrográficas, son parte de una serie de aspectos que debemos tomar en cuenta con el fin de no afectar el ecosistema como parte del proceso dinámico plasmado en la Figura 7.

**Figura 7. Elementos que componen una cuenca hidrográfica**

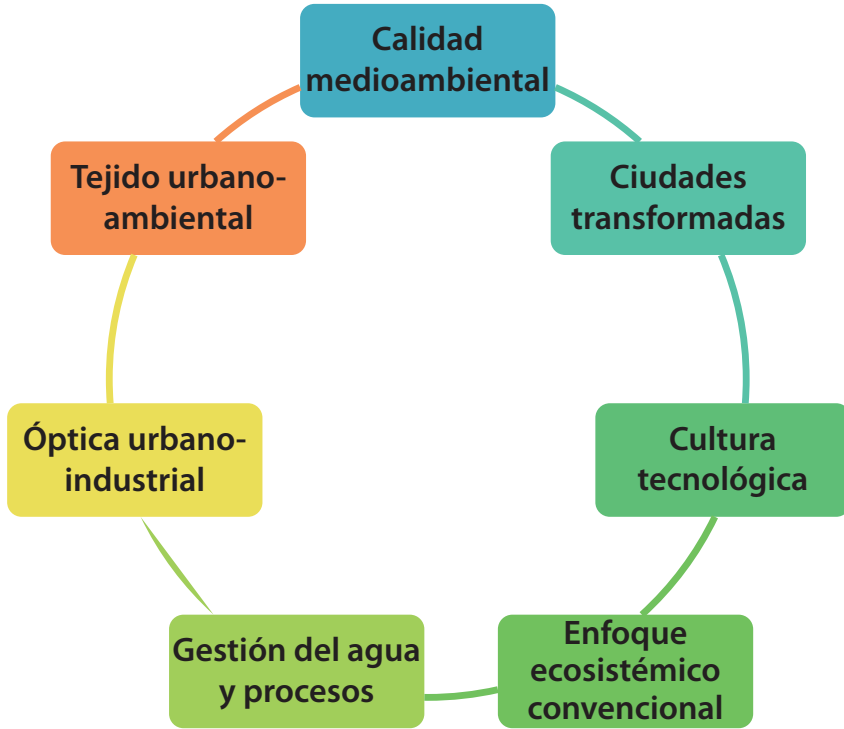


Fuente: adaptado de Mundo Geografía (s.f.).

Es de observar que, en la dinámica hidrológica de las cuencas, no puede permear la ignorancia, pues es parte del ecosistema que debe ser objeto de cuidado, en especial, cuando se trata de la calidad medioambiental del ser humano, la existencia de aquellas ciudades transformadas producto de la cultura tecnológica con existencia del enfoque ecosistémico convencional. Siempre permeará la gestión del agua en los procesos hidrológicos, cuya función se enruta hacia la óptica urbano-industrial,

pues se fundamentará en el tejido urbanoambiental para la preservación del ecosistema local como esencia de las cuencas de drenaje (ver Figura 8).

**Figura 8. Aspectos del proceso dinámico del agua en las cuencas hidrográficas para la preservación del ecosistema**



Fuente: Camargo Ponce de León, G. (2005).

Ciertamente, se puede expresar que las cuencas de drenaje en el desarrollo de la actividad de escorrentía cumplen funciones y usos esenciales, pues el Decreto 1729 de 2002 señala en el artículo tercero que:

El uso de los recursos naturales y demás elementos ambientales de la cuenca, se realizará con sujeción a los principios generales establecidos por el Decretoley 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, sus normas reglamentarias y lo dispuesto en el presente Decreto.

Siendo así, se puede imbricar que lo narrado se expresa en la Tabla 5:

**Tabla 5. Función esencial de una cuenca de drenaje**

<b>Funciones de una cuenca de drenaje</b>	
a.	Existencia de agua dulce que puede ser suministrada para consumo humano.
b.	Es un flujo de agua que, siendo regulado, puede ser distribuido en el área industrial.
c.	La calidad del agua es dependiente del mantenimiento que se le preste.
d.	Existencia de equipos de protección que permiten control frente a peligros naturales.
e.	El manejo adecuado permite el uso para el suministro de energía hidroeléctrica.
f.	Su uso contempla la recreación según los planes de gobierno.
g.	La garantía del uso puede ser sostenible como recurso natural.
h.	Permite la productividad de los recursos locales agrícolas y pecuarios, ente otros.
i.	Permite la integración de sistemas de uso de la tierra como medios de vida.
j.	Es parte del control de los sistemas dinámicos interactivos del medio ambiente.
k.	Facilita combinar los conocimientos locales y científicos hidrodinámicos.
l.	La conservación de la biodiversidad, interesante aspecto que resguarda a la humanidad.

Fuente: elaboración propia

Como puede observarse, una cuenca de drenaje es vital para la humanidad y la industria cuando se trata del debido uso del proceso de agua dulce como recurso natural. Ya la biodiversidad juega un papel esencial en la sostenibilidad de la vida humana, animal y vegetal, pero con énfasis hacia lo especial que es la conservación del sistema ecológico.

Finalmente, se suma a este comentario lo tipificado por el artículo 4 del Decreto 1729 de 2002 de Colombia sobre la ordenación de la cuenca u hoya hidrográfica desde su estructura físico-biótica: debe haber un cuidado para su aprovechamiento, conservación, defensa, equilibrio, planeación, preservación, protección y manejo para el uso sostenible.

## **2.2 Características físicas de una hoya hidrográfica**

Al revisar el contexto de una hoya hidrográfica, también se está relacionando a la cuenca de drenaje, entonces, establecer una conexión representativa del área donde las aguas superficiales o subterráneas son las variables esenciales no es menos cierto que estas vierten el contenido pluvial a una red natural denominada *cauces naturales*, continuos e intermitentes, pero, ciertamente, confluyen en uno mayor. Así

lo indica Monsalve (1999) al establecer que se debe estar en conocimiento sobre la variación en el espacio del régimen hidrológico, pero las características dependen de la morfología y las superficies de los suelos desde la óptica de la geología, pues también hay incidencia del hombre por las praxis agrícolas.

Dicho lo anterior, se explica cómo nacen las características físicas de una hoya hidrográfica, las cuales se encuentran en el área de drenaje, la forma de la hoya y el sistema de drenaje.

### **2.2.1 Área de drenaje**

El área de drenaje es la superficie que recibe las aguas pluviales dirigidas por los escurrimientos (Escuela de Ciencia del Agua, 2018), es decir, espacios formados en planos de proyección horizontal del suelo según la estructura de la cuenca de drenaje. Se destaca el hecho de que siempre estará limitada por las llamadas líneas divisorias que pueden ser reales o representativas, lo cual indica una frontera por ríos o afluentes direccionada al sistema de escorrentía al cauce (Ibáñez *et al.*, 2008).

También el área de drenaje de una cuenca se puede conceptualizar como el espacio perimetral asumido por una curva, cuya línea va trazada sobre el relieve en las divisorias de aguas entre niveles y escorrentías morfológicas de la red de drenaje del suelo (Camino *et al.*, 2018). En este apartado se aprecia que estas se dividen en subcuencas o subsistemas, siendo de alguna manera menor o mayor en función a la homogeneidad de la superficie.

Sin embargo, la UNESCO (2020) ha señalado que las áreas de drenaje forman parte del sistema ecológico y deberían ser objeto de estudios interdisciplinarios con el solo objeto de garantizar las diversas técnicas de mejoramiento del suelo aplicadas en la gestión de control de cuencas de drenaje y poder mitigar los efectos colaterales en dichas superficies.

La UNESCO (1986), hace más de tres décadas, había señalado tener en cuenta las áreas de drenaje desde los acuíferos para una mejor circulación del agua, bien en calidad y cantidad, pues es importante asumir con creces la delimitación de las áreas de drenaje para conocer estadísticas de precipitaciones, infiltrados de estas precipitaciones respecto a lo atmosférico y las caídas hacia las cuencas hidrológicas, cuyo fin es mantener el control del área de drenaje en la sostenibilidad del sistema ecológico mundial.

Es evidente que, al hablar de hidrología, se está en presencia de áreas de drenaje, aquellas superficies que permiten en su tejido horizontal el escurrimiento de aguas abajo (FAO, 1998). Entre tanto, las aguas que se comentan son aguas dulces, disponibles para la humanidad, siendo importante asumir ciertos datos como el tipo de agua existente en el planeta, los porcentajes disponibles y tener una idea global de la cantidad de las variables que permean las áreas de drenaje en el mundo.



En otras palabras, en el planeta las áreas de drenaje distribuyen un aproximado de 2.8 % del total del agua producto de las lluvias que se precipitan a tierra y escurren por medio de afluentes hacia las cuencas hidrográficas para formar parte de los acuíferos y saturación de los suelos (Varela, 2014).

Se observa claramente que se fundamenta el hecho de la intervención mundial que tienen algunos organismos para el control y preservación de la humanidad con tendencia al cuidado de las cuencas hidrográficas como la ONU, UNESCO, FAO y otros. Pues la humanidad requiere de un enorme apoyo internacional para la protección del vital líquido de agua dulce en función al consumo.

Además de tener aplicaciones en otras áreas, como las industriales, hidroeléctricas, hidromecánicas o hidroneumáticos, en función de ello debe haber un conocimiento cuantificable y porcentual del agua que fluye en las dimensionalidades del planeta reflejado en la Tabla 6.

**Tabla 6. Cuantificación porcentual del agua distribuida en el planeta**

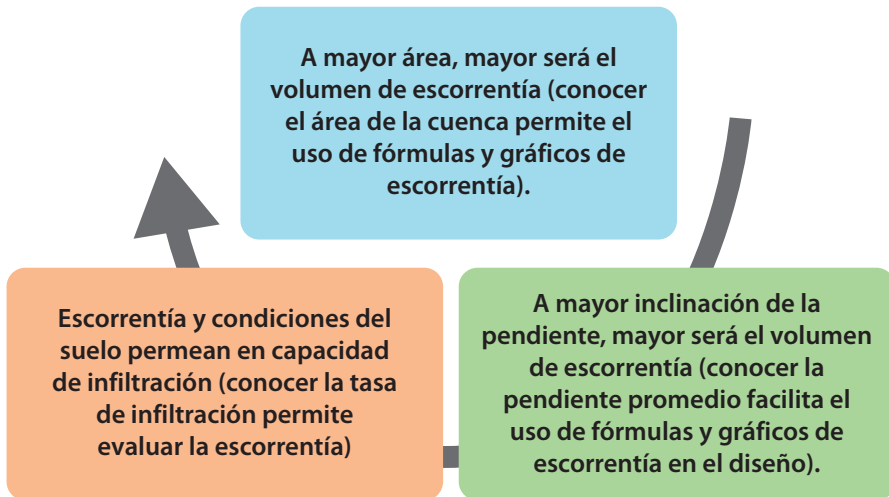
N°	Tipo de agua	Porcentaje mundial aprox.	
1	Disponibile en el planeta Tierra	97,2% agua salada de mares y océanos.	2,15%, ubicada en polos y glaciares (nivología: precipitación de nieve).
			0,0091%, escurre en superficie hacia lagos y ríos.
		2,8% remanente.	0,005%, alojada en suelos. Infiltra en el terreno, suelo y subsuelo. En el terreno, al ser saturado, permite evaluar el nivel freático.
2	Agua dulce (superficie y subterránea) -Hidrología-	Proceso atmosférico cíclico hidrológico: (evaporación en los océanos, precipitación sobre los continentes, infiltración- es cubrimiento y retorno a los océanos).	0,62%, reservorios de subsuelo (hidrogeología).
			0,001% del totalde agua del planeta.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Varela, R. (2014, p. 147).

En la contextualización de la Tabla 6, se observa que el mayor porcentaje de agua en el planeta está distribuido y ubicado en mares y océanos, siendo la modalidad salada en su condición fisicoquímica; sin embargo, el agua dulce de consumo humano y otras actividades está con un porcentaje mínimo. Esto indica que, como humanidad, debemos ser cuidadosos en la planeación, uso y conservación de las cuencas u hoyas hidrográficas, específicamente, en sus formas y sistemas de drenaje.

Ahora bien, cuando el área de drenaje juega un papel esencial en el sistema hidrológico, debemos asumir las incidencias donde el agua pluvial fluye en superficie filtrándose y saturando el suelo subterráneo, otra parte se evapora a la atmósfera y el resto va por escorrentía hacia las canales de la red de drenaje para expandirse en caudales dependiendo de varios factores señalados por FAO (1998) según la Figura 9.

**Figura 9. Factores que inciden para los cálculos del área de drenaje**



Fuente: elaboración propia con base en datos de FAO (1998).

Es de observarse que los conocimientos previos de datos sobre caudales y escorrentía de las aguas pluviales pueden incidir en los cálculos del área de drenaje. Entendiendo que toda cuenca es un espacio insidiado por el relieve topográfico. Así, Burgos *et al.* (2015) indican que los límites de una cuenca son establecidos en magnitud, lo cual es clave por los rasgos naturales, pero que también el ser humano incide en la configuración social del espacio geográfico direccionado al área de drenaje.

Finalmente, se trae a colación lo que Monsalve (1999) indica sobre el área de drenaje y la conceptualiza como “el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica” (p. 37). Se infiere que un área de la cuenca viene representada en  $\text{km}^2$  y que su superficie deberá drenarse desde las líneas divisorias hasta los puntos delimitados, bien por las curvas de nivel, que no coinciden con los cauces de la red de drenaje. Al saber que la forma de cálculo más común es a través del uso de hojas milimetradas, se indica la zona delimitada y determinada al contar los cuadros del área comprendida para luego obtener el resultado al totalizar.

### 2.2.2 Forma de la hoya

Las hoyas, como parte de un sistema hídrico, forman un área natural de eje de la zona donde se desaloja el agua a través de un sinnúmero de corrientes y caudales que llegan a un colector común (Henaó, 1988). Significa que una hoya preserva su forma en función a la naturaleza del suelo y, por tal razón, será de mayor o menor caudalidad para converger en un colector principal.

Con referencia a lo anterior, Monsalve (1999) señala que la forma de la hoya como característica esencial es importante porque de ella se deriva la relación tiempo-concentración, es decir, habrá un tiempo necesario que se inicia con la precipitación y así, en función al tiempo, toda la hoya pueda contribuir a la sección de la corriente sobre la superficie que esté en la praxis de ejecución desde los límites más extremos de la hoya hasta asumir y llegar a la salida.

Existen dos aspectos a considerar a tales efectos: el índice de Gravelius, o coeficiente de compacidad, y el factor de forma.

#### 2.2.2.1 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad

A los efectos del índice de Gravelius, o coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) ejemplificado en la Figura 10, Monsalve (1999) lo señala como aquella “relación entre el perímetro de la hoya y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la hoya” (p. 37). Existen aspectos matemáticos y fórmulas que se derivan de su contextualidad expresados de la siguiente manera:

**Figura 10. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $K_c$ )**

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

$K_c$  = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Fuente: Meza *et al.* (2014).

En estas circunstancias se puede determinar que, mientras más irregular sea la hoya en la superficie del terreno por su topografía, mayor será su coeficiente de compacidad ( $K_c$ ); esto significa que una hoya, mientras sea circular, presentará un coeficiente mínimo: su resultado será igual a uno. Por otro lado, el criterio que señala Monsalve (1999), es que “hay mayor tendencia a las crecientes en la medida en que este número sea próximo a la unidad” (p. 38).

En efecto,  $K_c$  se presenta como la forma circular que pudiese tener la cuenca, es decir, es la razón entre el perímetro (longitud del parteaguas o divisoria), la cual encierra la superficie y el perímetro circunferencial.

Por tal razón, el  $K_c$ , como coeficiente independiente del área, tiene un valor de uno para cuencas imaginarias (circulares), considerando que  $K_c$  nunca podrá tener valores inferiores a uno. Entendiendo que a mayor concentración de agua se producirá mayor volumen de agua concentrada por escurrimiento cuando su aproximación sea cercana a la unidad o a uno al resolver la ecuación tomando los datos del perímetro de la cuenca (longitud de la línea parteaguas), el perímetro de la circunferencia y el radio de la circunferencia.

Con referencia a lo anterior, el  $K_c$ , definido por Gravelius como “la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca” (Llamas, 1993, como se citó en Díaz *et al.*, 1999, p. 127). A estos efectos se trae a colación como ejemplo de cálculo del  $K_c$ , el caso del curso alto del río Lerma en el Estado de México, trabajo realizado por Díaz *et al.* (1999), quienes hicieron uso del SIG y MEDT. Es así como logran un resultado de  $K_c = 0,282 * P / \sqrt{A}$ , siendo P (perímetro) y A (superficie) de la cuenca. Si la cuenca tuviera forma circular en un 100 %, el  $K_c$  sería igual a uno, pero si  $K_c$  fuese igual a 1.128, sería una cuenca cuadrada; y si la cuenca fuese alargada, el  $K_c$  resultaría en una dirección hacia el valor de tres. En el caso del río Lerma, se generó un  $K_c = 1.481$ , lo que significó que la cuenca tiende a ser cuadrada. Estos datos son referenciados en la Tabla 7.

**Tabla 7. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) y su clasificación**

Rango de $K_c$	Clases de compacidad
1 - 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 - 1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50 - 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Meza *et al.* (2014).

### 2.2.2.2 Factor de Forma

Es otra característica de la forma de la hoya hidrográfica y se representa como  $K_f$ . Al respecto Monsalve (1999) es del criterio de que esta viene a representar “la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoya” (p. 38).

La dimensionalidad derivada de la longitud axial de la hoya “se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la hoya” (Monsalve, 1999, p. 38), el autor describe que el ancho medio se representa con B y se obtiene cuando se divide el área por la longitud axial de la hoya (L). Ver Figura 11.

**Figura 11. Fórmula de la hoya**

$$kf = \frac{B}{Lc} = \frac{B}{Lc^2}$$

Fuente: Montoya y Montoya (2009).

Por lo tanto, y con base en lo señalado anteriormente, según la fórmula significa que una hoya cuyo factor de forma se represente con valor bajo, está menos sujeta a las crecientes que una hoya cuyo valor en tamaño sea el mismo, pero habrá significación siempre y cuando el factor de forma sea mayor.

Otro significado que se le da al factor de forma es el expresado por Rojo (1997), quien asume la intervención de factores geológicos, pues estos moldean la forma de las cuencas hidrográficas, y pasa a denominarlo factor de forma de Horton ( $K_f$ ). Cuando el valor de  $K_f$  es superior a la unidad, bien cuando es proporcionado por el grado de achatamiento (cuenca), se deriva un resultado cuya tendencia es concentrar el escurrimiento de la precipitación de manea intensa dando lugar a las grandes crecidas.

A los efectos de este, es del criterio de Rojo (1997) señalar que el  $K_f$  “es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca” (p. 2), cuya fórmula es  $K_f = A/L^2$ . Significa que se intenta, de alguna manera, medir la dimensión de la cuenca, bien sea cuadrada o alargada.

Por tal razón, apegado a las ideas de Rojo (1997), si  $K_f$  es bajo, la cuenca está menos sujeta a crecientes, no así cuando una cuenca tenga la misma área y el  $K_f$  sea mayor. Principalmente, los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región, es decir, aquellas superficies terrestres, bien sea de forma espacial o sistémica, que representan la forma de las cuencas hidrográficas.

### **2.2.3 Sistema de drenaje**

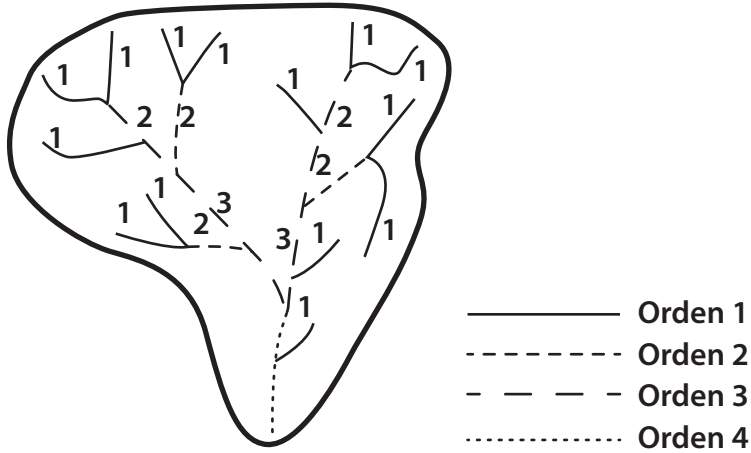
El sistema de drenaje es aquel cuya constitución, según Monsalve (1999), está prevista por “el río principal y sus tributarios” (p. 38).

#### **2.2.3.1 Orden de corrientes de agua**

“Refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una hoya” (Monsalve, 1999, p. 38).

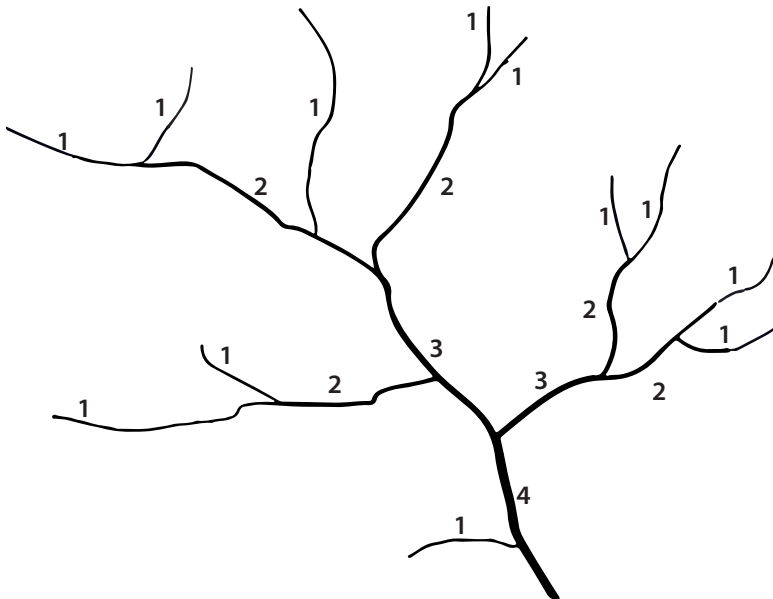
La clasificación de las corrientes de agua dada por Monsalve (1999), se realizan de forma divisional en órdenes según la Figura 12 y sus descripciones se ven reflejadas en la Figura 13.

Figura 12. Clasificación de las corrientes de agua según orden



Fuente: Monsalve (1999, p. 38).

Figura 13. Clasificación de las corrientes de agua en forma ramificada



Fuente: Tutoriales al día-Ingeniería Civil (s.f.).

### 2.2.3.2 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje viene representada como aquella relación vinculante entre la longitud total de los cursos de agua y el área total de la hoya o cuenca propiamente dicha (Monsalve, 1999). Para visualizar los parámetros con que la densidad de drenaje puede ser representada gráficamente, se expone la Figura 14.

**Figura 14. Densidad de drenaje**

$$D_d = \frac{\sum P}{A}$$

Donde:

$D_d$  = Densidad de drenaje (km/km<sup>2</sup>)

L = Perímetro de la cauces (km)

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Fuente: Meza *et al.* (2014).

### 2.3.3 Extensión media de la escorrentía superficial

La densidad de drenaje la definen Meza *et al.* (2014) como aquella distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una hoya. Además, se indica que la escorrentía, al generarse en línea recta, podría darse desde el lugar donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo del lecho de una corriente cualquiera de la hoya (Londoño, 2001; Monsalve, 1999).

Significa que los términos usados en la ecuación para una hoya de área serían A, siendo su representación un área de drenaje rectangular y, por otro lado, se tiene un curso de agua cuya longitud sería L, este igual a la longitud total de las corrientes de agua dentro de la hoya, pero que debería pasar por su centro. Así pues, la extensión media de la escorrentía superficial sería, según Ospina y Mancipe (2016), “Qmax, caudal máximo de creciente (m<sup>3</sup>/seg); C, coeficiente de escorrentía superficial medio ponderado en la cuenca; I, intensidad de precipitación, (mm/hora)” (p. 30) y A, área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

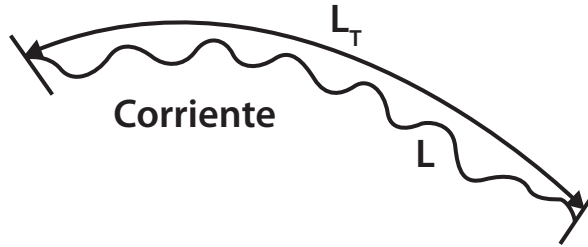
#### 2.2.3.4 Sinuosidad de las corrientes de agua

La sinuosidad de las corrientes de agua (S) viene a representar aquella relación entre “la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce, L, y la longitud del río principal medida en línea curva o recta, L<sub>t</sub>” (Monsalve, 1999, p. 40).

En otras palabras, la sinuosidad de las corrientes de agua (S) son parámetros cuya medida se genera por la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente (Monsalve, 1999). Recordando a Ospina y Mancipe (2016), cuando un valor sea menor o igual a 1,25, indica una baja sinuosidad y se constata entre más sinuosas sean las corrientes de agua en cuanto a las velocidades en el cauce. Así pues, la fórmula será:  $S = L / L_t$ . (valor adimensional).

Entonces significa que S es la sinuosidad, L es la longitud del río principal medida a lo largo del cauce y L<sub>t</sub> representa la medida en línea recta o curva, tal como se presenta en la Figura 15.

**Figura 15. Representación de la sinuosidad de la corriente de agua**



Fuente: Londoño (2001, p. 198); Monsalve (1999, p. 40).

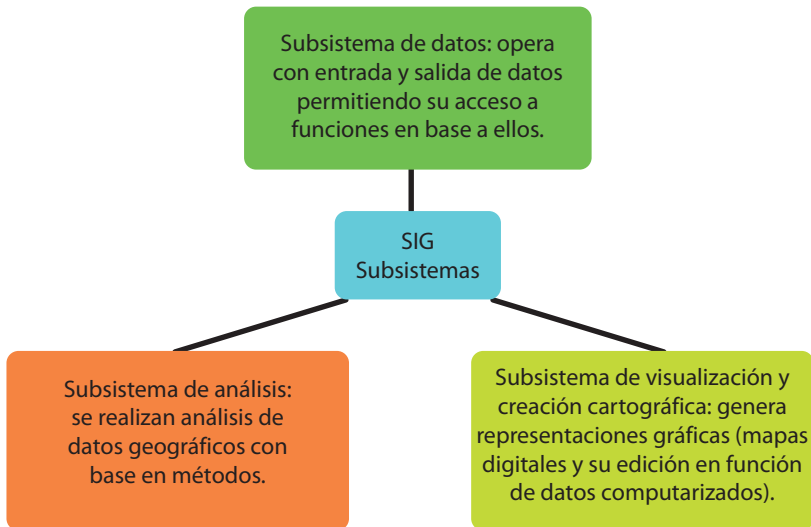
### 2.3 Características físicas usando *software* SIG

Los sistemas de información geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas computacionales, con ellas se digitaliza y organiza la topografía del suelo para su comprobación, integración y análisis de superficies, se hacen cálculos de enlaces punto a punto sobre las cuencas hidrográficas (Sosa y Martínez, 2009; Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006).

De la misma forma, se conciben las aplicaciones de los SIG, las cuales señalan Sosa y Martínez (2009): describir los terrenos (coordenadas espaciales en función de datos colectados), localizar asentamientos (uso de suelo bajo el esquema de almacenamiento de información para su edición) e, incluso, realizar varios diseños (mapas de riesgo y enlaces de comunicaciones, en función del manejo de datos entre subsistemas modelados de cuencas); además, por si fuera poco, están las bases de datos computacionales que permiten graficar y desplegar mapeos en tablas de los subsistemas de forma automatizada para la evaluación del sistema.

En ese orden de ideas, se hayan tres subsistemas de los SIG, cuyas aplicaciones más comunes son las indicadas por García (2021) y que son referidas en la Figura 16. Se inicia por el subsistema de datos, aquel cuya operación se genera como proceso permitiendo funciones de acceso; sigue el subsistema de visualización y creación cartográfica, en ello la edición de mapas digitales es el más computarizado bajo las diferentes representaciones gráficas; por último, se presenta el subsistema de análisis, aquel cuya función es generar los análisis respectivos sobre elementos geográficos según el proceso con base en métodos.



**Figura 16. Subsistemas de los SIG**

Fuente: elaboración propia con base en datos de García (2021).

En este orden de ideas se puede citar a Sáenz (1992), quien señala la importancia de los SIG para los profesionales de las ciencias de la Tierra y del mundo de la ingeniería, geografía, hidrología, geología, entre otras, ya que permite concentrar y compilar datos referenciales en la praxis de análisis geográficos. En el futuro, la tecnología evaluará lo espacial de sistemas optimizando datos en dispositivos de información espacial en forma digital.

Es evidente que los SIG permiten ventajas en la ingeniería y afines cuando se procesan datos para conocimientos geoespaciales y superficies, análisis de impactos y desarrollo de aplicaciones ambientales, específicamente, en las ciencias de la hidrología y similares. Al respecto, Sáenz (1992) recomienda preparar en las aulas de la Universidad Nacional de Colombia generaciones con visión a nuevos paradigmas en lo tecnológico y la optimización de los recursos; esencial la intencionalidad de la preparación profesional generacional del capital humano.

En los marcos de las observaciones anteriores, se trae el comentario de Álvarez (1993) quien, posterior a Sáenz, expresó en su contexto que los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una herramienta en el mundo de la ingeniería y demás ciencias afines como la hidrología y la geología, pues se basa en un conocimiento científico que permite optimizar en tiempo y espacio real una consulta inmediata, bajo la filosofía del conocimiento, sobre sus condiciones, potencialidades y limitaciones, las cuales deberían ser mínimas por parte de los especialistas.

Asimismo, Álvarez concluyó en su investigación diciendo que los SIG son herramientas que permitirán una aplicación masiva, una experiencia única basada en la praxis de las ciencias de la Tierra y afines, para ello es necesario evaluar los aspectos reflejados en la Figura 17.

**Figura 17. Características de los SIG**

### **Las ventajas**

Son de procesamiento versátil e inmediato de datos, cuyo manejo genera pronósticos espaciales de prevención y toma de decisiones por su almacenamiento compacto de datos.

### **Las desventajas**

Requieren de alta inversión y mantenimiento, en su actualización habrá que asumir tiempo, calidad y capacidad de uso en el proceso.

### **La formación profesional para la praxis del capital humano**

Requerimiento de capacitación y entrenamiento para la atención y participación de usuarios.

### **El paradigma profesional**

Rechazo al cambio de mentalidad técnica en los egresados, en función a la preparación futura en lo que respecta investigación y análisis.

### **El empoderamiento de información**

Datos con calidad procesal eficiente permitirán un claro liderazgo, experiencia en el avance hacia nuevas tecnologías, un eficaz manejo optimizado de los sistemas en la capacidad profesional en el uso de los SIG.

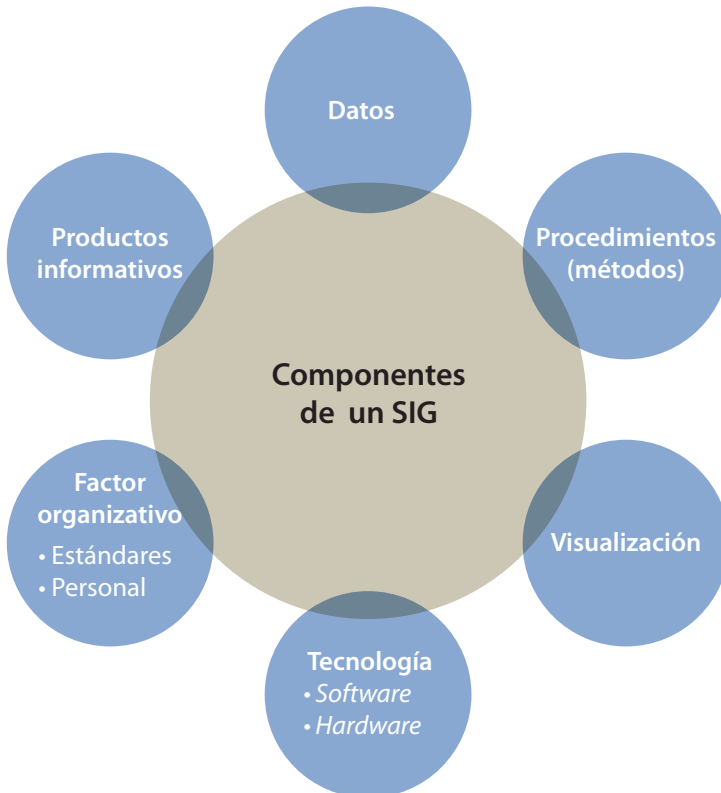
Fuente: elaboración propia con base en datos de Álvarez (1993).

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando, Benayas (2019) expone en su investigación una serie de características físicas que presentan los sistemas de información geográfica (SIG) donde sus aplicaciones son dadas en hidrología y demás ciencias afines. Es partidaria de que los SIG, como herramientas tecnológicas basadas en *software*, permiten de forma precisa la praxis en almacenar,

gestionar y analizar datos, además de ser parte de la toma de decisiones en todas las disciplinas y técnicas de la geoestadística.

En ese mismo sentido, Benayas (2019) considera que los SIG en hidrología han dado un gran avance en el siglo XX y avanzan vertiginosamente en el siglo XXI, pues desde hace más de cuatro décadas ha habido avances en estos *softwares* y, en la actualidad, ha sido un conocimiento fundamental en la planificación y gestión del agua por los estudios de pronósticos y alertas tempranas para la previsibilidad de desastres, cuya fiabilidad en el control de regímenes de caudales ecológicos e hídricos ha sido una gran herramienta en el análisis y evaluación. Al respecto, Benayas (2019) destaca características físicas del *software* de los SIG basándose en hechos tal como se exponen en la Figura 18.

**Figura 18. Características físicas del *software* de los SIG**



Fuente: Losada (2017).

Finalmente, se asume que los SIG permiten liderizar grupos en la toma de decisiones para una gestión en la praxis espacial en proyectos futuros de cálculos y evaluaciones para cuencas hidrológicas bajo los modelos digitales de superficies en sus características físicas y la identificación de los *softwares*.

## Referencias

- Álvarez, V. J. (1993). ¿Qué es un SIG? *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 4(1-2), 43-56.
- Benayas Polo, R. (27 de junio de 2019). *Los sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en hidrología*. IAGUA. <https://cutt.ly/cH4Cf7G>
- Burgos, A. L., Bocco, G. y Sosa Ramírez, J. (2015). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y Fundación Río Arronte.
- Braz, A. M., Mirandola García, P. H., Pinto, A. L., Salinas Chávez, E. y de Oliveira, I. J. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Camargo Ponce de León, G. (2005). *Ciudad Ecosistema. Introducción a la ecología urbana*. Universidad Piloto de Colombia.
- Camino, M., Bó, M. J., Cionchi, J. L., del Río, J. L., López de Armentia, A. y de Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Campoblanco Díaz, H. y Gomero Torres, J. (2000). Importancia de los ríos en el entorno ambiental. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de geología, minas, metalúrgica y ciencias geográficas*, 3(5).
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría A. M., Carrillo González, F. M. y Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (64), 26-34.
- Decreto 1729 de 2002 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. “Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones”. 6 de agosto de 2002.
- Díaz Delgado, C., Mamadou Bá, K., Iturbe Posadas, A., Esteller Alberich, M. V. y Reyna Sáenz, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: Caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *CIENCIA Ergo-Sum*, 6(2), 124-134.
- Escuela de Ciencia del Agua (6 de junio de 2018). *Runoff: Surface and Overland Water Runoff*. USGS. <https://on.doi.gov/3mXvUyq>

- García, P. (11 de agosto de 2021). *¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica?* Geoinnova. <https://acortar.link/Vc19Mw>
- Gutiérrez Caiza, C. (2014). *Hidrología básica y aplicada*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Henao, J. E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J. (2008). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1), 107-116.
- Londoño Arango, C. H. (2001). *Cuencas hidrográficas: bases conceptuales, caracterización, planificación y administración*. Universidad de Tolima. [http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdez/~edisp/inea\\_013115.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdez/~edisp/inea_013115.pdf)
- Losada, E. (2017). *Componentes de un SIG*. <https://geopaisa.blog/2017/10/04/componentes-de-un-sig/>
- Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O. y Tapia Tosetti, A. (2014). Análisis morfométrico de microcuencas afectadas por flujos de detritos bajo precipitación intensa en la quebrada de Camiña, Norte Grande de Chile. *Diálogo andino*, (44), 15-24. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-26812014000200003>
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (2ª. Edición). Alfaomega Grupo Editor.
- Montoya Moreno, Y. y Montoya Moreno, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los Andes, el Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 31-38.
- Mundo Geografía (s.f.). *Partes de la cuenca hidrográfica* [Imagen]. Mundo Geografía. <https://acortar.link/0Wt0VB>
- Montoya Moreno, Y. y Montoya Moreno, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15),31-38.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1998). *Diseño y construcción de carreteras en cuencas hidrográficas sensibles. Manual de campo de gestión de cuencas hidrográficas*. (Volumen 4). Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (s.f.). *Gestión de cuencas hidrográficas*. <https://acortar.link/Le9DHR>
- Ospina, M. y Mancipe, J. (2016). *Estudio Morfométrico y estimación de caudal por medio del método racional para la creciente de la quebrada Canauchita hasta la desembocadura en el río Chirche del municipio de Otanche en el departamento de Boyacá* [Tesis de grado, Universidad Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/2562/MancipeGironzaJuanSebastian2%20016.pdf;jsessionid=A42A76EB573EE7B-20C9BB8E72ECBD24E?sequence=3>
- Rojo, J. (1997). *Morfometría de cuencas*[Archivo PDF]. <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf><https://acortar.link/3bXESk>
- Sáenz Saavedra, N. (1992). Los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta poderosa para la toma de decisiones. *Ingeniería e Investigación*, (28), 31-40. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n28.20790>
- Sosa-Pedroza, J. y Martínez-Zúñiga, F. (2009). Los sistemas de información geográfica y su aplicación en enlaces de comunicaciones. *Científica*, 13(1), 27-34.
- Tutoriales al día-Ingeniería Civil (s.f.). *Algunos parámetros de forma y drenaje de la cuenca hidrográfica y su relación con el tiempo de concentración. obtenido de hidrología*. <https://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/algunos-parametros-de-forma-y-drenaje-de-la-cuenca-hidrografica-y-su-relacion-con-el-tiempo-de-concentracion/>.
- UNESCO (1986). *Manual de uso y conservación del agua en zonas rurales de América Latina y el Caribe: agua, vida y desarrollo* (Tomo 2).
- UNESCO (2020). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: Agua y cambio climático.
- Varela, R. (2014). *Manual de Geología*. Instituto Superior de Correlación Geológica.



## CAPÍTULO 3

# LAS PRECIPITACIONES

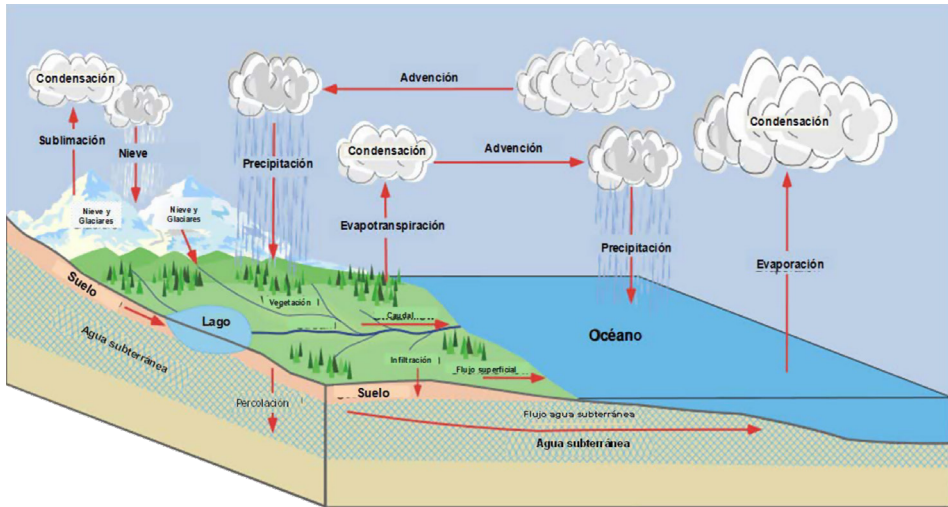
### 3.1 Generalidades

La precipitación representa en el mundo de las ciencias del agua aquella minúscula proporción que cae a la superficie terrenal en diferentes formas: líquida, sólida o vapor, como descomposición de las llamadas nubes, las cuales están formadas por gotas cuyo diámetro promedio significativo en milímetros es de 0,02 aproximadamente, generando cuerpos existenciales en el aire hasta producirse cambios físicos de tamaño, es decir, en aumento (Núñez, 2020).

La precipitación, como parte del proceso del agua en su transformación cíclica, tiene sus propios mecanismos dentro de diferentes procesos. Al respecto, Ordóñez (2011) señala que el ciclo hidrológico presenta diferentes escenarios principales, entre ellos: la evaporación, la condensación, advención, precipitación, congelación, sublimación, evapotranspiración y, continuamente, el ciclo; esto se puede observar en la Figura 19:



Figura 19. Ciclo hidrológico



Fuente: Ordóñez (2011, p. 9).

Con base en las consideraciones anteriores, se encuentran los llamados factores hídricos que configuran el comportamiento dentro de cada proceso que presenta la precipitación, como muestra la Figura 19: primero el proceso de coalescencia directa, aquel mecanismo cuya situación permea la unión múltiple en el diámetro de gotas de lluvia, pero que, al choque, causa la electrostática; en segundo lugar, el proceso de condensación del vapor, aquel que se produce cuando las gotas aumentan de tamaño por efecto de la temperatura para ser parte de la formación de la nube.

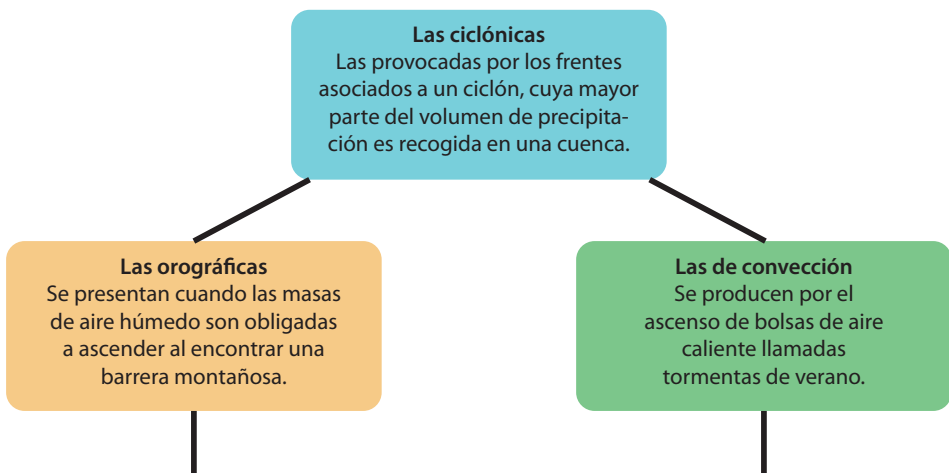
De forma que la precipitación como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico y meteórico siempre va a tender a ser parte de la superficie del suelo en forma depositada y va a existir cuando la atmósfera presente saturación con el vapor que, por ende, es direccionado a la condensación y, por efecto gravitacional, cae y se precipita de forma dispersa (Martínez, 2007). En otras palabras, las pequeñas gotas de agua chocan entre sí y aumentan miles de veces su volumen. Este proceso de colisión cae, a su vez, de la atmósfera a la superficie como rocío, granizo, nieve, escarcha o lluvia, terminando en precipitaciones útiles para la energía hidroeléctrica.

Igualmente, la precipitación que llega a la superficie de la Tierra es parte del campo de la generación de energía hidroeléctrica, ayuda a la aceleración y desempeña un papel estratégico que debe cumplirse bajo condiciones de ingresos y otras circunstancias para su desarrollo eficaz (Martínez y Villalejo, 2018). Así debe preverse una protección exclusiva en el seguimiento y cuidado de las precipitaciones, pues al aparecer en regiones y en las aguas arriba en caudales, causa inundaciones. También debe tenerse en cuenta en la construcción de un embalse en función de las condiciones del suelo.

A los efectos de este, se pueden expresar dos condiciones por las cuales la precipitación forma parte del proceso hidrológico: la evaporación y la infiltración (Aguilar y Ortega, 2017). Mencionan los autores que la primera es el proceso por el que las moléculas de agua líquida se convierten espontáneamente en gaseosas; desaparición gradual del líquido y la evapotranspiración. Esta última permite medir la cantidad de agua que se evapora, cuyos factores dependientes son temperatura, humedad relativa y viento en la zona de precipitaciones. En segundo lugar, la infiltración: proceso por el cual el agua en la superficie de la Tierra entra en el suelo, pero que debe considerarse la tasa de infiltración del agua producto de la precipitación e irrigación a través de pulgadas por hora o milímetros por hora (Bustos y Giraldo, 2021). Los autores señalan que las disminuciones de tasa hacen que el suelo se sature, pero si la tasa de precipitación excede a la tasa de infiltración, por supuesto que se producirá escorrentía, excepto por la presencia de una barrera física.

Asimismo, Sánchez (2017) expone la relación del origen y tipos de precipitaciones con base en su intensidad en un determinado tiempo, esto se puede observar en la Figura 20.

**Figura 20. Los tipos de precipitaciones basadas en la intensidad en un determinado tiempo**



Fuente: Sánchez (2017).

Como es de observarse, los tipos de precipitaciones generadas en la Figura 20 permiten inferir que estas parten básicamente dentro de cualquier estudio hidrológico. En ellas se direccionan el cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal entrada de agua a una cuenca, bien sea producto de las ciclónicas de convección u orográficas. Todo ello se configura a los efectos de asumir retos en lo fundamental de los diseños de obras públicas, dado que es esencial medir la intensidad de precipitación en un tiempo determinado.

Todo ello significa asumir los parámetros para llegar a la cuantificación de las precipitaciones (Sánchez, 2017). Estas medidas pueden darse en función a las caídas en un punto cualquiera de recogida y medida en milímetros, por ello que sea interesante evaluar la intensidad de la precipitación en un lapso bajo la expresión mm/hora.

### 3.2 Precipitación, formación y tipos

La precipitación, como variable de estado hidrológico, puede caracterizarse por su intensidad, su distribución en el espacio y el tiempo y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia (Pérez y Senén, 2017). García (2017) señala que es necesario disponer de un gran número de observaciones extraídas de las series pluviométricas con el fin de definir el modelo de comportamiento en una zona determinada y permitir su posterior análisis o utilización.

La precipitación es considerada por Moreno y Montero (2016) como la cantidad de humedad en la atmósfera que cae a la superficie en forma líquida (llovizna, lluvia) o sólida (escarcha, nieve, granizo). “La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la hidrología, y junto a la evaporación, constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua” (Moreno y Montero, 2016, p. 23).

En este mismo orden y dirección, en la formación de la precipitación, existen varios factores a considerar por cuanto se necesita la humedad atmosférica para convertirla en precipitación. Ávila (2017) y Fattorelli y Fernández (2011) expresan que para la formación de la precipitación se hacen evidentes los factores externos indicados en la Figura 21:

**Figura 21. Formación de la precipitación a partir de factores externos**

#### a) Saturación (por enfriamiento)



#### b) Fase de vapor cambia a líquido o sólido



#### c) Crecimiento de pequeñas gotas de agua o cristales de hielo y un aumento en su masa, lo que les permite caer



Fuente: elaboración propia con base en datos de Fattorelli y Fernández (2011).

Se puede apreciar en la Figura 21, que las dos primeras condiciones darán lugar a la formación de nubes, mientras que la intensidad y la precipitación dependerán de la humedad del aire y de la velocidad vertical, la cual se induce al enfriamiento, entre otras condiciones, por la influencia del aire ascendente en función a la masa de aire, determinando el tipo de precipitación, en virtud a que toda precipitación va direccionada a la caída de la atmósfera al suelo, bien por gravedad o bien por las leyes de la física.

Por las consideraciones anteriores, se permite el autor explicar los tipos de precipitaciones, estas se originan por efecto serie de la física y correlacionadas al ambiente cuyos elementos meteóricos inciden en sus desarrollos. Esta clasificación o tipología se indica en la Figura 22.

**Figura 22. Tipos de precipitaciones**

**a. Ciclónica**

La temperatura incide en las nubes. Por su efecto diferencial las más calientes son impulsadas a la parte alta donde se produce la condensación y precipitación (condición zona de baja presión, atracción de vientos, su tipología es frontal, si es no frontal aquella produce lluvias de moderada intensidad, pero de considerable duración).

**b. Orográfica**

Ascenso del aire cálido a las montañas incide por altitud, pendiente y orientación cuya distancia separa el origen de la masa del aire caliente del levantamiento (intensidad y frecuencia regular, producen lluvias más 800 a 100 mm anuales).

**c. Conectiva**

Causado por el ascenso del aire cálido más liviano que el aire frío. Produce lluvias puntuales con intensidades que varían entre lloviznas ligeras de alta intensidad (40-120mm/hora) y corta duración (30 minutos a 2 horas); son lluvias que producen granizo.

**d. Por la forma en que cae**

En estas se pueden distinguir diversos tipos de precipitación: lluvia, llovizna, chaparrón o aguacero, nieve, rocío, escarcha y granizo.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Ávila (2017) y Fattorelli y Fernández (2011).

Se observa en la Figura 22 plenamente que da lugar a la formación de las precipitaciones en función a cuatro fases, pues se derivan a razón de ciertas condiciones que establece el contexto que la incide.

Sin embargo, Reyes (2016) hace énfasis en el proceso de formación de las precipitaciones e incluye en esta dinámica los factores generadores, compartiendo lo mencionado por Ávila (2017), Fattorelli y Fernández (2011) ya citados respecto a las precipitaciones ciclónicas, pues son incidenciadas por un pasaje frontal entre masas de aire y agua elevadas caliente-frío-húmedas-cálidas, encontradas entre sí, condensando al enfriar y cuya humedad interviene originando las precipitaciones.

Finalmente, las precipitaciones orográficas, aquellas cuya elevación del aire va en relación con una cadena montañosa, se generan como producto de los vientos cargados con aire húmedo que condensan el vapor y forman nubes y precipitaciones. Dadas las precipitaciones convectivas, se generan por elevación del aire caliente en función a la radiación solar, condensan vapor en zonas frías, siendo acompañadas, algunas veces, por efectos de descarga eléctrica. Todo ello, correlaciona los tipos de precipitación y su medida, pues avanza hacia la “Iniciación a la Meteorología y Climatología” de Reyes (2016), quien establece novedades en las dimensiones de aplicabilidad de métodos de determinación de las precipitaciones y medidas pluviométricas.

### 3.3 Medidas pluviométricas

Las precipitaciones se miden al nivel de la capa freática horizontal, expresadas en milímetros de agua por unidad de superficie ( $l/m^2$ ). En consecuencia, se introducen en el curso como perturbación aerodinámica, pero, aunque la muestra recogida sea muy pequeña en relación con la precipitación total, su medición no puede repetirse nunca. Si bien es cierto que los parámetros característicos en la medición de la cantidad son necesarios para los cálculos, también lo es que deben expresarse en milímetros por día, cuya medición se realiza con el pluviómetro de volumen/área que refleja la intensidad de la precipitación por unidad de tiempo.

La medición de la precipitación puede expresarse en mm/hora, mm/min u otra unidad, pero, por supuesto, esta puede determinarse en función del pluviómetro existente. A efectos de la aplicabilidad técnica para realizar las respectivas mediciones de la precipitación, existen dispositivos de medición señalados en el año 1989 por Chereque Morán en su obra *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*, que poseen vigencia y los mismos principios como los siguientes:

- a. Pluviómetros no registradores. Son los más utilizados. Miden la cantidad de agua en períodos cortos (1 día). Consisten en un recipiente en el que se recoge la lluvia que cae a través de un embudo para reducir la evaporación.

- b. Pluviómetros totalizadores. Suelen ser no registrables y se utilizan en zonas de difícil acceso. No se leen más que una vez al año y, por lo tanto, deben tener una mayor capacidad. Se utilizan sustancias como la vaselina para evitar la evaporación.
- c. Pluviómetros registradores o pluviógrafos. Se trata de un dispositivo que registra el cambio continuo de la profundidad de las precipitaciones a lo largo del tiempo (pluviograma). Existen varios tipos de pluviómetros. La información proporcionada por el pluviómetro se registra para poder ver la evolución temporal continua de las precipitaciones.
- d. Nivómetro. Mide la altura de nieve sobre una superficie plana horizontal. De tal manera que la nieve, al igual que la lluvia, pertenece a los hidrómetros que se precipita desde las nubes. Así pues, se puede medir con un pluviómetro, aunque para ello existen otros instrumentos especiales llamados medidores de nieve (Viñas, 2021).

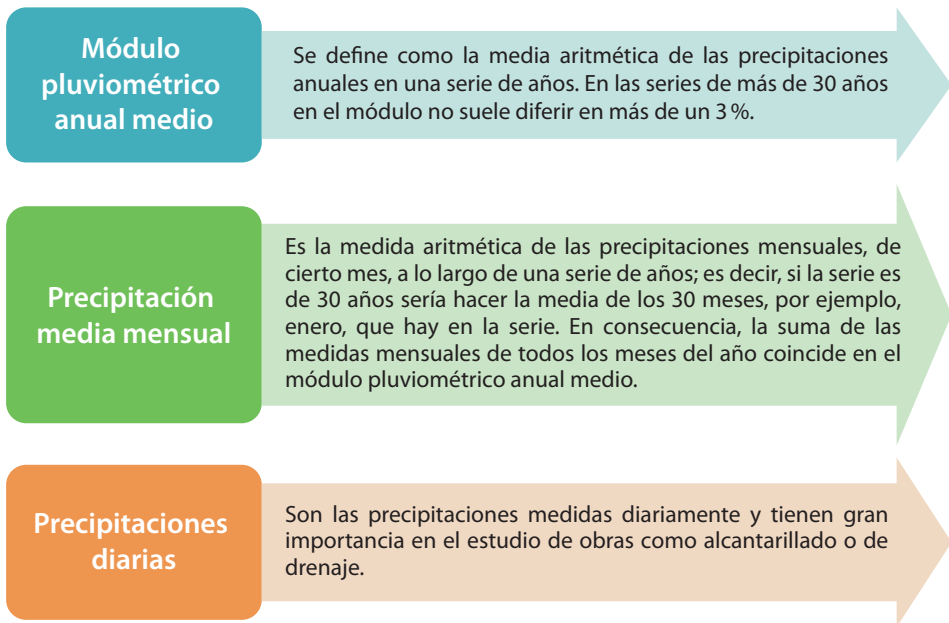
Para ello, se puede introducir una simple regla con divisiones centimetradas en vertical en la capa de nieve hasta que su extremo inferior toque el suelo. Esto da una medida, aunque no sea oficial. En ese sentido, los observatorios meteorológicos, generalmente, se encuentran donde las nevadas son abundantes y suelen aplicar métodos similares con medidores de nieve. Es una vara de medición anclada a una plataforma horizontal que ayuda de soporte en el suelo. La observación se realiza a las 8 UTC cuando más de la mitad del terreno en el que se encuentra el observatorio o la estación meteorológica se ha cubierto de nieve en las últimas 24 horas (Viñas, 2021). Sin embargo, el autor indica que los datos se expresan en centímetros enteros y se redondean al centímetro entero más cercano (por ejemplo, 10,8 cm se registran como 11 cm de nieve acumulada).

En definitiva, un estudio pluviométrico óptimo depende de la red de pluviómetros instalados en la zona de estudio, de la accesibilidad de la zona y de los condicionantes económicos, así como de los valores de las precipitaciones intensas de corta, media y larga duración que, a mayor densidad, mayor necesidad de equipamiento posible en la distribución espacial en busca de homogeneidad y densidad de equipos.

Con referencia a lo anterior, en el año 2017, la Universidad Externado y el Nodo Colombia trabajaron las tendencias nacionales frente a los 15 desafíos globales del Proyecto del Milenio, allí se plasmó el futuro de Colombia, donde fueron consideradas las condiciones hidrológicas, climatológicas y topográficas que garantizan para el país qué significa esto. Las tendencias permiten visualizar la importancia que tienen los equipos y aparatos pluviométricos y pluviógrafos en función de la evolución de la información local, cuyas políticas públicas de gestión deben direccionarse desde las nuevas tecnologías en la hidrología, en especial, el contexto de las precipitaciones (Coronel y Estévez, 2017).

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando, se plasma lo contextualizado de los datos pluviométricos generados en las investigaciones de Ramírez *et al.* (2015). Los autores señalan que los datos habituales que se pueden obtener de una estación pluviométrica son la precipitación diaria, la precipitación en diferentes intervalos de tiempo (1 hora, 30 minutos, 20 minutos y 10 minutos), la precipitación mensual, el número de días de lluvia, nieve o granizo en el mes y la precipitación máxima diaria en el mes. Se definen diferentes términos para la determinación de los valores medios y puntuales en el mes y el año, expresados en la Figura 23.

**Figura 23. Determinación de los valores anual medio, media mensual y diarias, puntuales en el mes y el año**



Fuente: elaboración propia con base en datos de Ramírez *et al.* (2015).

Como puede observarse en la Figura 23, se indica la concepción del módulo pluviométrico anual medio, el cual parte de media aritmética de las precipitaciones anuales en forma de serie de años, es decir, en series mayores a 30 años. El módulo no suele diferir en más de un 3%; por el contrario, la precipitación media mensual, refiere aquella media aritmética de las precipitaciones mensuales durante una serie de años. Esto indica que, si la serie es de 30 años, entonces, sería hacer la media de los 30 meses, cuya suma de las medias mensuales de todos los meses del año coincide con el módulo pluviométrico anual medio. No obstante, las precipitaciones diarias representan las precipitaciones medidas diarias para estudio de diseño de obras de alcantarillado y drenaje.



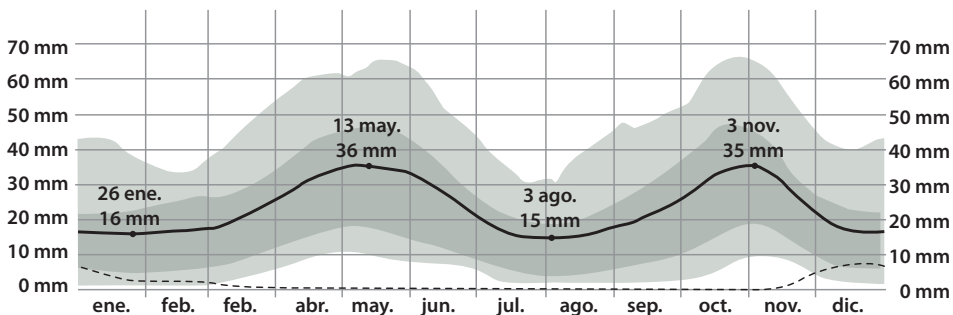
En consecuencia, se deja clara la concepción de un esencial equipo para la medición de las precipitaciones que es el pluviómetro. El pluviómetro está diseñado para recoger el agua en una bureta con una sección transversal más pequeña que la boca del pluviómetro con el fin de ofrecer una lectura más precisa ( $\pm 0,1$  mm) del agua recogida. El agua recogida se lee una vez al día.

Desde el punto de vista geométrico, el tamaño de la boca del pluviómetro no influye en el número de milímetros recogidos, pero hay una variación muy pequeña en función del tamaño del recipiente y de su altura con respecto al suelo, por lo que estos parámetros se establecen para cada país. El error más común es colocar mal el pluviómetro. Según las normas nacionales y universales, se debe estar alejado de los árboles y de los edificios altos, por lo general, al menos el doble de la altura del obstáculo.

A continuación, en la Figura 6 se recogen datos de medición de una bureta según WeatherSpark (s.f.) en función del clima y del tiempo promedio en todo el año en bureta.

En la Figura 24, se representa la lluvia en función del promedio (línea sólida) acumulado en un periodo de 31 días en una escala móvil, ahí se encuentra centrada en el día seleccionado con las estimaciones porcentuales, del 25° al 75° y del 10° al 90°. La línea punteada se refiere a la precipitación de nieve con una relación media correspondiente (Weather Spark, s.f.). Como se observa, el promedio de lluvia mensual a partir de enero fue de 16mm, febrero 16,3mm, marzo 20,1mm, mayo 36mm, junio 35,4mm, julio 22,7mm, agosto 15mm, septiembre 15,7mm, octubre 20,8mm, noviembre 35,5mm y diciembre 17mm. Estos resultados facilitan a las autoridades del poder público y otros organismos interesados en la pluviometría la alerta a complejidades y predecir situaciones remotas meteorológicas.

**Figura 24. Promedio mensual de lluvia en bureta**



Fuente: Weather Spark (s.f.).

### 3.4 Precipitaciones puntuales y especiales

Es un tema de gran interés, pues en un régimen de precipitaciones es típicamente unimodal porque estas proceden concentrándose entre periodos mensuales, debido a la activación de la convergencia tropical a mediados y finales del verano astronómico del hemisferio norte (Hurtado y Mesa, 2015). Este proceso permite partir de datos concretos en los que la precipitación media anual en la zona evaluada se sitúa entre 1500 mm y 3000 mm.

Cabe agregar que la situación sobre las precipitaciones puntuales extremas se basa en los riesgos hidrometeorológicos, lo cual expone a las personas a peligros que pueden provocar pérdidas humanas. Los cambios extremos de temperatura en la unidad plantean retos y problemas específicos de este fenómeno climático, lo que provoca pérdidas humanas en las comunidades vulnerables.

Por lo tanto, el acceso al agua para el desarrollo económico de un país, y en particular de la zona evaluada, debe ser una opción basada en los requerimientos de atención especial a la población bajo eventos de precipitación específicos y particulares (Hurtado y Mesa, 2015).

En la obra de los autores antes mencionados, se aprecia que existe un proyecto binacional holístico desarrollado en zona regional mexicana donde sirve de plataforma para la formación basada en la sustentabilidad hídrica y para la formulación de una conciencia social en función de futuras acciones de prevención de la escasez de agua como punto de partida hacia las precipitaciones puntuales y especiales.

#### 3.4.1 Método aritmético

El proceso de cálculo de la media aritmética de las condiciones de precipitación consiste en calcularla a partir de los valores conocidos de todos los puntos de un área determinada, es decir, el método de la media aritmética es un método que da buenos resultados, para lo cual, la distribución de estos puntos debe estar en un área homogénea y con variabilidad; ambos valores se encuentran en un pequeño indicador del rango % (Moreno y Montero, 2016).

La media aritmética (MA) es la media de los datos de precipitación puntuales de las estaciones de una zona geográfica determinada. Sin embargo, el principal inconveniente de este método es que no tiene en cuenta características adicionales que pueden influir en la precipitación como la presencia de cordilleras, la proximidad al océano y las condiciones meteorológicas imperantes (Pizarro *et al.*, 2003).

### 3.4.2 Método de polígonos de Thiessen

Es un método importante para medir las precipitaciones. Mientras que la primera opción implica un cierto grado de subjetividad, el diagrama de polígonos es completamente objetivo. Cada ciclo de precipitación está delimitado por un polígono, y se supone que todo el polígono tiene la misma cantidad de precipitación que el punto central, es decir, el final del ciclo. Sin embargo, para construir los polígonos es necesario trazar segmentos de línea que conecten las distintas estaciones de recogida de precipitaciones como bisectrices perpendiculares (perpendiculares al punto central) (Cuza *et al.*, 2021).

Como ejemplo del uso de los polígonos de Thiessen, Cuza *et al.* (2021) diseñaron un estudio para identificar y analizar las zonas de impacto del sistema de salud en la ciudad costera de Quintana Roo, México. Los investigadores ampliaron el uso de diferentes tipos de estudios, en este caso, los sistemas de información geográfica (SIG), una herramienta utilizada en la geografía de la salud. Se utilizaron polígonos de Thiessen como herramienta indirecta para determinar la esfera de influencia de los establecimientos de salud en las cuatro ciudades costeras de Quintana Roo (Cancún, Playa del Carmen, Tulum y Chetumal).

Así, con las variables relevantes para el estudio, el impacto fue real, hubo un punto de saturación, y se concluyó que los espacios públicos deben transformarse en nuevos centros de salud y que los centros de salud son zonas de alta y muy alta densidad de población. La distribución de hospitales y su reubicación son barreras existentes que requieren del conocimiento de nuevas herramientas de planificación de políticas públicas (Cuza *et al.*, 2021).

Al aplicar el polígono de Thiessen a los estudios de estos autores, se observó que la ciudad de Cancún tiene el mayor número de establecimientos de salud, las mayores densidades de población y el mayor grado de marginación en comparación con las otras ciudades estudiadas.

Los resultados pueden presentarse en forma de mapas y tablas para las unidades seleccionadas en el proyecto COVID-19. En otras palabras, se dibujan los polígonos de Thiessen, se determina el área ( $S_i$ ) y se calcula el valor  $P$  medio ( $P_m$ ) mediante una media ponderada.  $P_n$  corresponde al valor del punto y la ecuación utilizada también refleja el mapa isotérmico cuyas moléculas corresponden al volumen de agua depositado (Cuza *et al.*, 2021; Sánchez, 2017).

De tal forma que el método del polígono de Thiessen se utiliza cuando la distribución de los aspersores no es uniforme en la zona considerada (Pizarro *et al.*, 2003). El método de cálculo supone el trazo de una línea entre las áreas de influencia de cada estación en las inmediaciones, que la línea es atravesada por una línea perpendicular y que toda el área alrededor de la estación, delimitada por la intersección de las

líneas perpendiculares, recibe la misma cantidad de lluvia que la estación. En algunos casos, es necesario modificar ligeramente este método para compensar los posibles efectos topográficos y, en lugar de trazar una línea vertical en la mitad de la distancia entre las estaciones, se traza una línea que conecta las estaciones con el punto medio del terreno (Figura 25).

**Figura 25. Método Thiessen para el cálculo de la precipitación media**



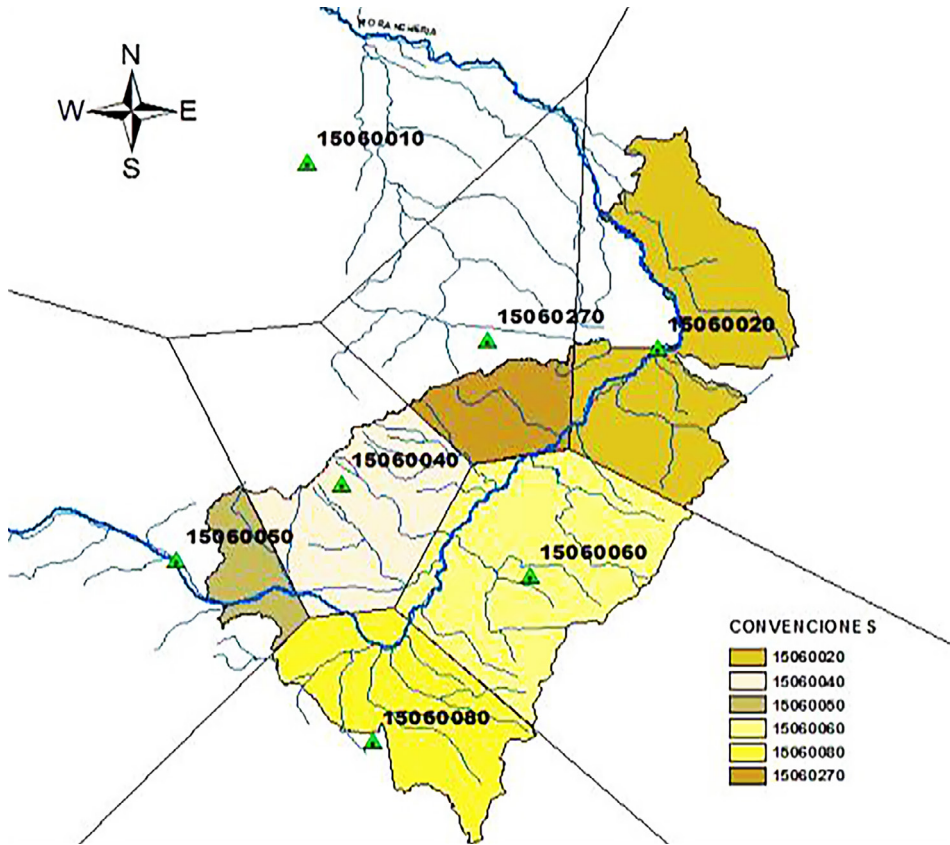
Fuente: García (2017, p. 40).

Por lo tanto, cuando se comienza a calcular el área contenida en cada punto de medición y se relaciona con el área total del polígono, se toman los pesos relativos para cada pluviómetro y se obtiene el valor medio de la lluvia a partir de la media ponderada (Moreno y Montero, 2016).

Siguiendo con los ejemplos de los polígonos de Thiessen, para los cálculos de precipitaciones medias, se tiene lo siguiente: con el modelo de la cuenca media construido en sistemas de información geográfica (ArcGIS, por su sigla en inglés) o SIG se realizaron los polígonos de Thiessen en la cuenca media del río Ranchería, México (Moreno y Montero, 2016).

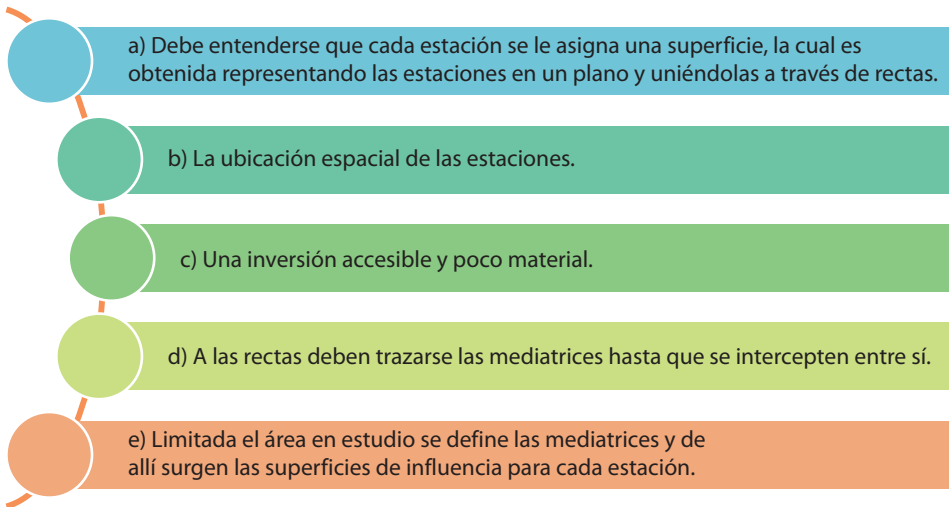
Esto generó en las seis áreas de influencia correspondientes a las estaciones seleccionadas, donde la distancia entre una y otra estación fue influyente, que no recubriera ninguna área de influencia de la cuenca elegida ni diera lugar a la ponderación del área de la zona en estudio. Se expone el mapa de los polígonos del ejemplo en la Figura 26.

Figura 26. Ejemplo de los polígonos de Thiessen en la cuenca media del río Ranchería



Fuente: Moreno y Montero (2016).

Dadas las condiciones que se representan en la Figura 26, se puede inferir que los polígonos de Thiessen son flexibles y sin complicación alguna en la praxis; dado a su información pluviométrica solo requiere para su ejecución lo señalado por Pizarro *et al.* (2003) y lo complementado en la Figura 27.

**Figura 27. Condiciones previas en la praxis del uso del método de polígonos de Thiessen**

Fuente: Moreno y Montero (2016).

El método del polígono de Thiessen, por el contrario, tiene un gran inconveniente, ya que su distribución de colocación estacional y la superficie plana de influencia mostrada en la Figura 27 se basan en una misma, respectivamente, sin tener en cuenta las diferencias de topografía. La precipitación en una estación se suma porque se supone que es igual a la precipitación en el área geoméricamente representada por esa estación. Esto se debe a que, hipotéticamente, el resultado debería ser más preciso que el método (Pizarro *et al.*, 2003) si cada estación se pondera con una superficie diferente.

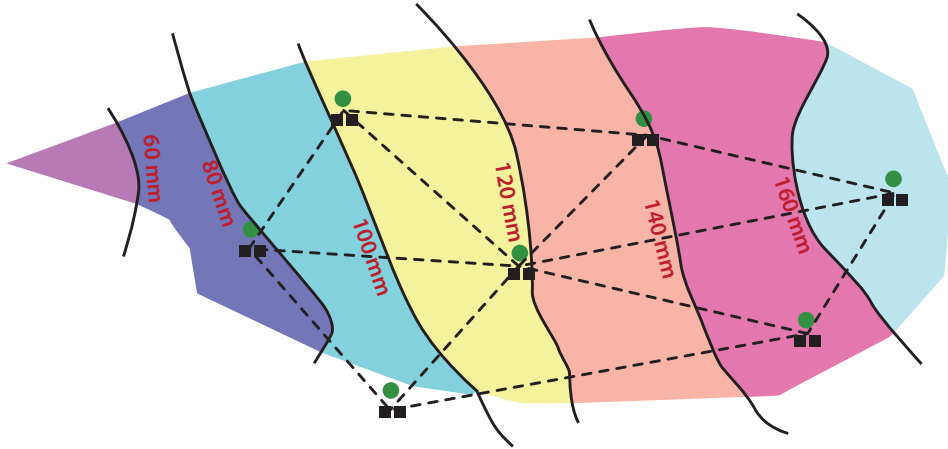
En otras palabras, este método (método Thiessen modificado) es como una mezcla de polígonos Thiessen e isoyetas. Esto significa que los resultados deben ser fiables y, por lo tanto, la información encontrada es esencial para el trabajo práctico, dada la existencia previa de isoyetas. Está totalmente coordinado y su precisión forma parte de la calidad de los datos de los sedimentos aluviales. Sin embargo, siempre habrá variaciones en el número y la posición de las estaciones, como puede verse en la nueva representación gráfica (Figura 28), junto con las medidas poligonales de las formas actualizadas (Pizarro *et al.*, 2003).

### **3.4.3 Método de isoyetas**

Es un método de cálculo de curvas de nivel con alturas pluviométricas iguales mediante la interpolación entre pluviómetros adyacentes. En otras palabras, existe porque hay que medir el área entre isoyetas sucesivas, multiplicarla por la precipitación media entre isoyetas adyacentes y la suma de este producto en toda el área es el área total media (Pizarro *et al.*, 2003). A continuación, la Figura 28

muestra un ejemplo de mapa de una isoyeta con sus partes esenciales (Moreno y Montero, 2016).

**Figura 28. Método de las isoyetas para el cálculo de la precipitación media**



Fuente: Procesamiento de los datos de precipitación (s.f.).

Como puede verse en la Figura 28, en la práctica hidrológica, el plano de la curva de isoyeta debe estar disponible cuando se han producido o se espera que se produzcan precipitaciones intensas. Una curva de isoyeta es una curva que une puntos con la misma cantidad de lluvia y su elaboración requiere un conocimiento general del tipo de tormentas que se producen en la zona.

Por lo tanto, deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros: a) los segmentos que conectan las estaciones que se van a estudiar deben ser los mismos, b) la pluviometría de cada estación debe tomarse según Thiessen, c) la pluviometría con la que se forman las curvas de nivel debe expresarse de forma independiente y d) la diferencia entre la distancia y la pluviometría entre las dos estaciones conectadas por cada segmento debe expresarse proporcionalmente. En la práctica, debe tenerse en cuenta cinco parámetros.

Por supuesto, en la práctica, el método de la curva de isoyeta debería ser el mejor entre los cinco métodos, pues es esencial para la inclusión de las áreas de precipitación, pero, al mismo tiempo, es muy subjetivo debido a la experiencia y el acceso a la información que tienen los expertos encargados de trazar estas curvas (Pizarro *et al.*, 2003).

En este sentido, Pizarro *et al.* (2003) consideran que el método isométrico presenta las siguientes condiciones para su aplicación práctica:

- a. Su ventaja es que es la mejor aproximación a la verdadera precipitación media en una región determinada, lo que permite la construcción de isoyetas teniendo en cuenta los efectos locales.
- b. Es más laborioso en términos de tiempo y material.
- c. Requiere la disponibilidad de mediciones de: 1) la precipitación para el periodo y punto de interés, 2) la precipitación normal para cada estación, 3) el material cartográfico adecuado y el conocimiento espacial y atmosférico más detallado de la zona de interés. Dado el enfoque de tejido a partir de las dimensiones y condiciones del método de la curva de isoyeta, el mapa de isoyetas debe proporcionar la construcción de una línea de aislamiento que cubra los puntos dentro del intervalo seleccionado. Sin embargo, es necesario determinar el tamaño de la línea de aislamiento que depende del período cubierto y del tamaño del área cubierta.

Así las cosas en el contexto referido, un ejemplo de la construcción de un mapa de isoyetas anuales se puede obtener presentando isoyetas cada 100 mm con base en un área pequeña, pero el espaciamiento debe ser reducido porque la región tiene una alta variabilidad de la precipitación (Sánchez, 2017).

Otro factor importante es el mapeo de isolíneas cuando no hay suficientes puntos en la zona, y si se estudia previamente la relación entre  $P$  y la altitud, las curvas de nivel en el mapa pueden ayudar, especialmente, en el caso de precipitaciones intensas, donde deberían aplicarse isolíneas de menor tamaño (ejemplo hipotético: 10 mm).

Para calcular el valor  $P$  medio ( $P_m$ ), basta con tomar una media ponderada del valor  $S_i$ , el área obtenida al trazar las bandas entre isolíneas, y el valor  $P_i$ , la cantidad de precipitación atribuida a cada isolínea.

Sin embargo, si se dispone de datos de precipitación, es necesario que se vayan a dos rangos de valores extremos ( $P'1$  y  $P'n$ ) para ser atribuidos o estimados, por lo que la construcción de un mapa de isoyetas es adecuada porque es el documento principal dentro del estudio hidrológico de la cuenca: no solo cuantifica los valores medios, sino que también se puede representar gráficamente la distribución espacial de la precipitación en un periodo de tiempo (Sánchez, 2017).

Este método se realiza en la práctica y se calculan los datos con un rango hipotético de 50 mm entre cada isoyeta utilizando las isoyetas de ArcGIS. Aquí, la distribución es según el rango establecido dado por la precipitación media anual en cada estación, y el cálculo es una serie reconstruida de precipitación, es decir, son los resultados de la precipitación media.



### 3.4.4 Método IDW

El método de la distancia inversa al cuadrado (IDW) es el más reciente que se ha analizado y su importancia radica en su facilidad de aplicación en los SIG. Esta ponderación es una función cuadrática y depende en gran medida de la cantidad de precipitación en la estación más cercana y, al considerar una serie o diferentes puntos de evaluación, se pueden formar grupos concéntricos de estimaciones alrededor de las estaciones (Pizarro *et al.*, 2003).

Este método divide una cuenca o área en estudio por celdas, dado que la cantidad de precipitación en las celdas no medidas depende de la cantidad de precipitación en las celdas vecinas con valores medidos, que es el cuadrado de la inversa de la distancia que las separa (Pizarro *et al.*, 2003).

Los métodos anteriores son funcionales en algunas condiciones debido al alto porcentaje de fiabilidad que proporciona ventajas, pero el método que utiliza la ponderación inversa de la distancia (IDW) es funcional cuando la información pluviométrica de las estaciones es cercana. La variable principal puede ser funcional dependiendo de las distancias existentes entre el observatorio y el observador para el que hay que reconstruir los datos que faltan.

Dado que los cálculos del método se realizan según las distancias, da lugar a diferentes variables, cada una de las cuales es un punto de cálculo, es decir, cuanto mayor sea la distancia del observatorio al punto de interpolación, menor será su peso. En términos generales el método se aplica de la siguiente manera:

$$x(t) = (k_1 \cdot x_1(t)) + (k_2 \cdot x_2(t)) + (k_3 \cdot x_3(t)) + \dots$$

Donde  $k_i$  es el inverso de la distancia y se determina de la siguiente manera:  $k_i = 1/d^{\alpha}$ . Siendo  $d$  la distancia entre la estación índice y la estación con la que se va a completar el dato, y  $\alpha$  el factor de potencia que toma el valor de 2.

En resumidas cuentas, el método IDW representa una estimación hacia la precipitación o la elevación del terreno, pero con probabilidades de conocer diferentes técnicas de interpolación. Los valores configurados, conocidos y verificados, se estiman en puntos desconocidos por interpolación. Por lo tanto, si el IDW es objetivo, entonces, los valores cercanos a la función son los que están más relacionados entre sí, y estos valores deben ser adicionales (Villatoro *et al.*, 2008). Significa que IDW debería ser viable y factible cuando los datos sean densos y estén distribuidos de manera uniforme y eficaz.

### 3.4.5 Método de kriging

El método de interpolación espacial se basa en el algoritmo tradicional de kriging, un método que amplía las coordenadas espaciales tradicionales X y Y a coordenadas

espaciales y espectrales y utiliza los índices de vegetación como información adicional en el algoritmo de interpolación. El porcentaje de radiación reflejada por la superficie en relación con la radiación siempre incide sobre ella y se utiliza como información adicional en el algoritmo de interpolación.

Sin embargo, el método tradicional de kriging se basa en una interpolación derivada de la teoría de las variables localizadas que tomó su concepto de la geoestadística (Oliver y Webster, 1990).

En este caso, los autores se basan en una representación semivariable de la variabilidad espacial, cuyas partes cuantifican la incertidumbre de la estimación minimizando el error de autopredicción. Por lo tanto, las herramientas de interpolación IDW y *spline* se consideran métodos de interpolación determinista, ya que se basan directamente en valores medidos del entorno o en fórmulas matemáticas dadas que determinan la suavidad de la superficie resultante.

En ese sentido, la modalidad de interpolación consiste en métodos geoestadísticos como el kriging que se basan en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Dado esto, los métodos geoestadísticos no solo son capaces de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan cierto grado de certeza o precisión a las predicciones (Oliver y Webster, 1990).

El método kriging supone que la distancia o la dirección entre los puntos de la muestra refleja una correlación espacial que puede utilizarse para explicar las variaciones de la superficie. Ajusta una función matemática cuya magnitud se especifica en algunos o todos los puntos de un radio determinado para establecer el valor inicial de cada lugar. También es un proceso de varios pasos que implica: a) el análisis estadístico exploratorio de los datos, b) la modelización de variogramas, c) la creación de superficies y d) la investigación de la varianza de las superficies.

Este método es el más apropiado cuando se sabe que hay efectos direccionales o de distancia correlacionados espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la edafología y la geología. Gracias a estas dos variables, el método es a la vez convencional y versátil.

En este sentido, el kriging convencional es el método de kriging más común y extendido y se utiliza por defecto. Asume que la media constante es desconocida. Esta es una suposición razonable, a menos que haya una razón científica para rechazarla. El kriging universal, en cambio, supone una tendencia poco fiable en los datos. Por lo tanto, se añade una función polinómica a una predicción para obtener resultados significativos, y solo debe utilizarse si se conoce la tendencia de los datos y se puede dar una justificación científica para describirla (Oliver y Webster, 1990).

### 3.5 Precipitaciones diarias y horarias

La determinación de la probabilidad de los eventos más extremos permite controlar la distribución espacial y la correlación a partir de los valores de los datos de precipitación de la estación y de la región, donde la estadística básica permite medir la intensidad de la precipitación moderada o menor, alta o baja, bien en términos horarios o diarios.

La precipitación anual con parámetros fisiográficos puede ser baja o alta en una región, pero se determina cuando es la media diaria máxima de las estaciones locales plurianuales de la red regional y en un período u hora determinados.

La profundidad de las tormentas puede utilizarse para predecir las tendencias de intensidad a lo largo del tiempo de su duración y si son extremas en la zona que se evalúa, pero cuando su intensidad aumenta en climas más cálidos, pueden producir más eventos extremos debido a los cambios climáticos y meteorológicos en escalas de tiempo horarias o diarias.

Los registros hidrométricos de crecidas permiten desarrollar y evaluar los métodos hidrológicos porque basan sus resultados en curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Con algunas capacidades de estimación de curvas, no se puede confiar en los datos de los pluviómetros, lo que deja una base para predecir la precipitación horaria y diaria. Esta última relación lineal se da en función de las previsiones regionales y de las relaciones lineales, así como de las previsiones de precipitación horaria más precisas.

Finalmente, las curvas IDF más fiables se estiman mediante el método de la curva IDF que se basa en la fórmula de Chen: esta representa la relación intensidad-longitud-periodo, donde se deben conocer los datos de precipitación para las horas y los minutos, es decir, la intensidad de precipitación en mm/h. La intensidad de la precipitación en mm/h por período de retorno, es necesaria conocerla pues, la ocurrencia y distribución espacial de la precipitación máxima diaria y los extremos de precipitación estimados en diferentes períodos permiten optimizar tiempo en mejor adaptación al comportamiento extremo del patrón de precipitación con el fin de reducir los efectos del riesgo.

### 3.6 Curvas de masas y hietogramas de aguaceros puntuales de diseño con datos de precipitación históricos

Una curva de masa se define como una traza de la precipitación total durante un período de tiempo en un sistema de ejes con valores de tiempo (normalmente horas) en el eje horizontal y la precipitación total (mm) en el eje vertical (Segerer y Villodas, 2006).

Del mismo modo, la curva de masa se utiliza generalmente para describir las características de las tormentas consideradas por separado, con los valores correspondientes basados en los registros de precipitación. Las observaciones de la curva de masa proporcionan una clara indicación de la intensidad y el momento de la precipitación durante la tormenta y la pendiente de la curva de masa corresponde a la intensidad de la precipitación en cada punto.

Las secciones en las que la curva de masa es horizontal indican periodos sin precipitaciones. A partir de la pendiente de la línea recta entre los puntos extremos de la curva de masas es posible determinar la intensidad media de las precipitaciones en un intervalo de tiempo correspondiente a la duración de una tormenta. Si, como suele ser el caso, existen registros de precipitación correspondientes a la precipitación total de un período determinado, se permite suponer para la reconstrucción de la curva de masa de dichas estaciones la misma distribución que la registrada por los pluviómetros de la zona en la que se supone que las características de la precipitación son homogéneas.

De hecho, todas las coordenadas de las curvas de masa disponibles se ven afectadas por la relación de la precipitación total medida en las dos estaciones durante el periodo considerado. La curva de masa de precipitación generada es la información más deseable para cualquier estación de la cuenca o de la zona en estudio, pero para obtenerla es absolutamente necesario un registro pluviométrico.

El hietograma, al igual que la curva de masa, es un gráfico lineal de la precipitación asociada a un día o a una tormenta concreta, recogido a intervalos de tiempo regulares, a veces durante un periodo más largo en el eje horizontal: mensual o anual. Para los datos mensuales o anuales, los datos diarios son suficientes; para un día o unas horas, se necesita una banda de precipitación que muestre la cantidad de precipitación que cayó en un intervalo seleccionado. Incluso si no se dispone de datos de precipitación y solo se dispone de la precipitación diaria, se puede calcular utilizando la fórmula de Chen (Sánchez, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, el histograma como representación gráfica de la precipitación es una función del tiempo, con la unidad de precipitación en milímetros, y se representa mediante un histograma con el tiempo en meses o años en el eje X y la precipitación en el eje Y (Sánchez, s.f.; Segerer y Villodas, 2006). Por lo tanto, esta estructura puede verificarse mediante la obtención de un registro de precipitaciones, con el tiempo (horas o minutos) en el eje horizontal y la intensidad de la precipitación (mm/h) en el eje vertical, es decir, el sistema de precipitación generado durante una tormenta determinada.

### 3.7 Hietogramas puntuales de aguaceros de diseño con curvas Intensidad - Duración - Frecuencia

Cuando se estudia la precipitación, se necesitan curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para registrar la precipitación en los hietogramas (Segerer y Villodas, 2006). Cuando una estación tiene una larga serie de registros plurianuales, que incluyen tormentas de diversa gravedad, se pueden trazar curvas de intensidad/ocurrencia para diferentes frecuencias, lo que es muy importante para el diseño hidrológico.

En general, los gráficos se trazan a partir de curvas correspondientes a diferentes tiempos de recurrencia relacionados con un sistema de ejes que representan el tiempo en el eje de abscisas y la intensidad de la precipitación en mm/h en el eje de ordenadas (Segerer y Villodas, 2006). Basándose en el uso de las curvas IDF, permiten generalizar sus resultados combinando sus valores con un análisis de los planos de isoyetas de las tormentas registradas en la cuenca o región (ver Figura 29).

**Figura 29. Pasos por seguir para construir las curvas de la IDF en una estación de tormentas**

(a) Seleccionar las precipitaciones intensas caídas en los años del periodo para los que se disponen de registros.

(b) Conocer las horas de inicio y fin de la curva de masas.

(c) Determinar la duración típica o características de las precipitaciones intensas en la región, analizando la intensidad y la duración de las tormentas registradas.

(d) Determinar la cantidad máxima de precipitación (mm) caída en intervalos de tiempo crecientes, según la duración y las características de los chubascos registrados.

(e) Agrupar la intensidad de las precipitaciones en mm/h, período, duración creciente.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Segerer y Villodas (2006).

A los efectos del comentario anterior, los pasos a seguir para construir las curvas de la IDF, en una estación de tormentas, según Segerer y Villodas (2006), son los indicados en la Figura 29.

Como ejemplo de lo antes comentado, Pérez y Senén (2017) realizó un estudio de curvas de intensidad-longitud-frecuencia de tormentas de corta duración en la cuenca del río Segura para identificar estrategias de gestión y planificación de recursos hídricos e hidráulicos, así como de dimensionamiento de infraestructuras para evitar riesgos en la humanidad.

### 3.8 Hietogramas de los aguaceros especiales

El estado de un determinado hietograma sobre aguaceros especiales y de precipitaciones imprevistas se deriva el hecho de su construcción porque requiere de la asunción de una serie de condiciones. Esto se debe al hecho de conocer la posición de las pendientes, las cuencas activadas por la dinámica hidrogeomórfica, las precipitaciones excepcionales de los períodos mensuales y anuales, la interpretación de la dinámica hidrogeomórfica de las subcuencas de drenaje, los parámetros morfológicos de las características de la respuesta hidrológica, todo esto sería adecuado para realizar los cálculos y mediciones en parámetros morfológicos (Méndez *et al.*, 2007).

Así, el sistema hidrogeomorfológico permite controlar la densidad media de drenaje, la alta intensidad, el tamaño de las tormentas, la intensidad y duración de las lluvias o las precipitaciones fuertes en una banda estrecha. Evidentemente, es necesario conocer el tiempo, corto, largo o intermedio de concentración, las estimaciones de los picos de crecida, los picos del hidrograma único y los tiempos hasta los picos, las redes de drenaje y las reacciones rápidas y violentas del sistema (Méndez *et al.*, 2007).

Por lo comentado, se debe prever riesgos de los escenarios críticos, como las inundaciones, o los eventos especiales, ya que que la duración de las lluvias y la magnitud e intensidad de las tormentas tengan un valor significativo como tiempos de respuesta hidrológica a las inundaciones y crecidas. La respuesta hidrológica es rápida e intensa para eventos con periodos de retorno de 50, 100, 500 o 1000 años en el caso de Venezuela, con descargas máximas de 85,61 m<sup>3</sup>/s-1, 134,96 m<sup>3</sup>/s-1, 245,14 m<sup>3</sup>/s-1 y 339,36 m<sup>3</sup>/s-1 respectivamente (Méndez *et al.*, 2007).

Como resultado, los modelos topográficos instantáneos de un solo hietograma para una zona determinada pueden facilitar la evaluación de los picos de crecida, los riesgos de inundación, los movimientos de masas, las avalanchas de tornados, el desarrollo de sistemas de alerta temprana y la evaluación de los cambios de caudal desde intervalos de tiempo (diarios, horarios y anuales).

### 3.9 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Su construcción depende de las cantidades de igual probabilidad empírica, cuyas intensidades deben dirigirse a las diferentes duraciones, máximas o no, anuales, mensuales o diarias. Hay que tener especial cuidado con la función temporal (Pizarro *et al.*, 2003).

De este modo, las cantidades de intensidad y los momentos potenciales pasan a ser una función de la construcción de las curvas de la IDF, la gestión de la intensidad

máxima anual en los intervalos de tiempo, cuyos eventos deben analizarse de forma independiente.

Al respecto, Hurtado y Mesa (2015) señalan que la metodología más utilizada está relacionada con las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), que se utilizan en ingeniería hidrológica para la planificación, el diseño y la ejecución de proyectos hidráulicos y obras de protección contra las crecidas máximas. Para estas últimas se hace necesario evidenciar los resultados en representaciones gráficas.

Hecha la observación anterior, los mapas, como representaciones gráficas de las precipitaciones formadas, permiten plasmar los resultados de la intensidad de lluvia para diferentes periodos en función del retorno y duración de las precipitaciones. Las curvas IDF son una de las herramientas más utilizadas en la estimación de las tormentas de diseño en sitios con falta de información de caudales y aforos, siendo necesario ajustar los valores de intensidad máxima a una función de distribución de probabilidad (FDP por sus siglas en inglés) de Gumbel, la cual varía de acuerdo con la zona que se modela (Grajales y Carvajal, 2019).

Por otro lado, la función de distribución más usada es la *Generalized Extreme Value Distribution* (GEV), traducida significa “distribución de valor extremo generalizado”, la cual sirve para representar las precipitaciones en función a sus periodos de retorno elevados, pues los resultados en los test de bondad se ajustan a todas (Pérez y Senén, 2017) mientras que los valores conservadores de la distribución de Gumbel ha sido reemplazada por la distribución SQRT-ET-máx (De Salas *et al.*, 2007) para precipitaciones máximas, conocida en Latinoamérica como *square root exponential type* (TERC) que significa “tipo exponencial de raíz cuadrada”, se evidencia la postura de estos autores por recomendar el uso de la TERC frente al resto.

### **3.9.1 IDF con datos históricos precipitación**

Las IDF con datos pluviométricos históricos llevan el mundo de la hidrología a un nuevo y emocionante nivel. Los hechos históricos permiten una permeabilidad a las probabilidades y nos enseñan que debemos aceptar desafíos consistentes al conocimiento actual. Estos datos son un componente elemental para los proyectos que relacionan la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, es decir, una probabilidad de ocurrencia o el período de retorno de alerta.

Temez (1978) indica que es importante adoptar y conocer las curvas de IDF porque proporcionan datos que pueden ser necesarios para los puntos de cruce en las curvas representativas cuya intensidad, aunque a intervalos de duración variable, permite la correspondencia a través de las frecuencias o períodos de retorno.

### **3.9.2 IDF por método simplificado**

Comienza con el cálculo de las curvas, pues al ser un método adecuado se hace necesario comprobar la consistencia de la información obtenida y, en caso de ser así, proceder a compararlas con los resultados que se hubieran obtenido. El método simplificado funcionaría en ausencia de estaciones de datos de precipitación a corto plazo (registros de precipitación).

Uno de los métodos más utilizados es el método simplificado: se definen ecuaciones para generar curvas de IDF en función de la región geográfica. El método genera resultados elevados, lo que implica parámetros de cálculo elevados y le permiten generar un factor de seguridad.

Por ello, se presentará una simplificación de los métodos para hallar las curvas de IDF construidas en una serie de casos, pero teniendo en cuenta que este método no se recomienda para las ecuaciones con una pequeña cantidad de datos recogidos.

Por otro lado, hay que tener en cuenta la distribución desigual de las estaciones, las cuales se concentran en su mayoría en estaciones meteorológicas, hidrológicas e hidrometeorológicas.



## Referencias

- Aguilar García, R. y Ortega Guerrero, M. A. (2017). Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 91-104. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.430>
- Ávila Vásquez, A. A. (2017). *Generación de intensidades máximas de la estación Pluviográfica Jaén*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1093>
- Bustos Amaya, J. y Giraldo Barahona, J. R. (2021). *Prototipo recolector de agua atmosférica a partir de un sistema de Atrapanieblas en el sector Camellón Las Lajas-Tenjo, Cundinamarca, con punto de control en la vereda Los Colorados en el municipio de Pasca- Cundinamarca* [Tesis de grado, Universidad Antonio nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5182/3/2021JonnathanBustosAmaya.pdf>
- Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Coronel Cardona, P. B. y Estévez Quebradas, Y. (2017). *Futuro de Colombia frente a los 15 desafíos globales del proyecto de milenio. Plan Prospectivo Estratégico – Nodo Colombia*. Universidad Externado de Colombia. <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/689>
- Cuza-Sorolla, A., Hernández-Aguilar, M. L. y Barrera-Rojas, M. Á. (2021). Aplicación de polígonos Thiessen para la definición y análisis de áreas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo. Quivera. *Revista de Estudios Territoriales*, 23(1), 49-71. <https://doi.org/10.36677/qret.v23i1.14504>
- Fattorelli, S. y Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico* (2ª edición). Water Assessment & Advisor y Global Network.
- García Trujillo, A. (2017). *Obtención de curvas de Intensidad, Frecuencia y Duración de la precipitación para la región de Trinidad* [Tesis de grado, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas]. <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/8649>
- Grajales-Cardona, D. y Carvajal-Serna, L. F. (2019). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia no estacionarias para la cuenca del río Medellín. *DYNA*, 86(208), 321-328. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69300>

- García, A. (2017) *Obtención de Curvas de Intensidad, Frecuencia y Duración de la Precipitación para la Región de Trinidad*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8649/Tesis%20Final%20de%20ARIATNA.pdf?sequence=1&isAllowed=n>
- Hurtado Montoya, A. F. y Mesa Sánchez, Ó. J. (2015). *Cambio climático y variabilidad espacio – temporal de la precipitación en Colombia*. *Revista EIA*, 12(24),131-150. <https://doi.org/10.24050/reia.v12i24.879>
- Martínez Arroyo, A. (2007). El agua en la atmósfera. *Ciencia*, 58(3), 36-44.
- Martínez Valdés, Y. y Villalejo García, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: Una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- Méndez, W., Córdova, J., Cartaya, S. y Pacheco, H. (2007). Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, Estado Vargas, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 22(1), 5-20.
- Moreno Rodríguez, M. L. y Montero Torres, J. J. (2016). *Evaluación de variables climáticas para cuantificar el recurso hídrico disponible en la cuenca media del Río Ranchería* [Tesis de grado, Universidad de La Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil/159](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/159).
- Núñez, S. (26 de octubre de 2020). *Tipos de precipitaciones*. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html>.
- Procesamiento de los datos de precipitación*. (s.f.). [Archivo PDF]. <https://1library.co/document/z3gm027y-procesamiento-de-los-datos-de-precipitacion.html>
- Oliver, M. A. y Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3), 313-332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Ordóñez, J. J. (2011). *Cartilla técnica ciclo hidrológico*. Sociedad geográfica de Lima. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf)
- Pérez-Sánchez, J. y Senén-Aparicio, J. (2017). Curvas intensidad–duración–frecuencia de tormentas de corta duración en la cuenca del río segura. *Agrociencia*, 51(6), 607-616.
- Pizarro, R., Ramírez, C. y Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *BOSQUE*, 24(3), 31-38. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002003000300003>

- Ramírez Cruz, H., López Velasco, O. y Ibáñez Castillo, L. A. (2015). Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 151-159.
- Reyes, V. (2016). Iniciación a la Meteorología y Climatología [Reseña de libro]. *Revista de Investigación*, 40(87), 295-298.
- De Salas Regalado, L., Carrero Díez, L. y Fernández Yuste, J. (2007). MAXIN: aplicación SIG para la estimación de valores Intensidad-Duración-Frecuencia de precipitaciones en la España peninsular. *Revista Digital Del Cedex*, (146), 137.
- Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Editorial Create Space Independent Publishing Platform.
- Sánchez, J. (s.f.). *Precipitaciones* [Archivo PDF]. Universidad de Salamanca. <https://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>
- Segeer, C. y Villodas, R. (2006). *Hidrología I. Unidad 5: Las precipitaciones*. Universidad Nacional de Cuyo. <https://1library.co/document/zxxowrdz-hidrologia.html>
- Serrano, S. y Basile, L. (2012). La precipitación intensa vista desde la criticalidad autoorganizada y las transiciones de fase continuas: un nuevo enfoque de estudio la granja. *La Granja, Revista de Ciencias de la Vida*, 15(1), 5-18.
- Temez, J. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.
- Viñas, J. M. (21 de marzo de 2021). *¿Cómo se mide la nieve caída?* Meteored. <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/la-medida-de-la-nieve-caida-nivometros-que-son.html>
- Weather Spark (s.f.). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Bureta*. <https://bit.ly/3tQ4COI>.

## CAPÍTULO 4

# ESTADÍSTICA EN HIDROLOGÍA

El futuro de las obras en materia de hidrología depende mucho de las probabilidades y estadísticas que recurran en la historia de eventos posibles. Es importante la cantidad de eventos sucedidos y el tiempo en el cual se generen. De allí la necesidad de asumir un control sobre los datos muestrales en determinados periodos para la construcción de obras u obras especiales. No obstante, es compleja la generación de casos dada la situación en función de estimaciones bajo la confiabilidad producto de la frecuencia estadística.

En materia de hidrología, la estadística viene dada por las probabilidades basadas en las distribuciones y sus funciones, claro está que, producto de ellas, dan cabida a ser estudiadas teóricamente en este capítulo, en el cual se explican en términos de distribuciones de probabilidades como lo son la normal o Gauss, log-normal, Gumbel o valores extremos, log-Gumbel, la distribución de log Pearson, Pearson tipo III, la distribución de Wakeby, las pruebas de bondad y ajuste, las frecuencias de lluvias, la frecuencia de lluvias totales y, por último, pero no menos importante, las frecuencias de lluvias máximas.

### **4.1 Presentación y análisis de datos**

La presentación y análisis de datos representados en el contexto de la estadística, cuyo ámbito es la hidrología, son aval sumamente esencial porque, dentro del control en tiempos determinados sobre eventos recurrentes o repetitivos en

periodos, permiten tener un historial de años clave para las distribuciones de frecuencia de eventos.

Al respecto, Barreto (2012) expresa que “la Estadística permite explicar las condiciones regulares en los fenómenos de tipo aleatorio, que componen buena parte de nuestro mundo” (p. 7). Significa que el avance en la sociedad del conocimiento es parte esencial en el conocimiento mismo sobre la praxis de la estadística.

El análisis de datos es fundamental porque en el contexto de la estadística es cada vez más interesante, dado a la generación de información que permite tener oportuna respuesta a eventos recurrentes basados en principios, técnicas y procedimientos. En los efectos de la hidrología, juega un papel esencial, por ejemplo, en el clima y sus factores, cuyas incidencias en máximas y mínimas frecuencias, si se determinan respuestas oportunas, se evitarían daños de gran magnitud ante las probabilidades de eventos fortuitos.

## **4.2 Distribuciones de probabilidad de interés en hidrología**

Según la estadística en hidrología, son variables que por sus dimensiones pueden darse tanto simétricas como asimétricas (Sánchez, 2022). Respecto a las primeras, estas variables son las denominadas distribuciones normales o de Gauss, pero las segundas, que no se encuentran enmarcadas dentro de las primeras, pasan a ser asimétricas. Las ecuaciones en el desarrollo estadístico dan cabida a las variables aleatorias y continuas que son conjugadas en sus apreciaciones axiológicas y cuyos registros de datos son permisivos desde los extremos.

Cuando hay presencia de variables cuyos logaritmos se ajustan a la distribución de Gauss, mas no los valores, en hidrología se les denomina distribución log-normal. En la existencia de precipitaciones o caudales anuales, se puede observar cómo los valores medios suelen ajustarse a la distribución simétrica de Gauss, pero los valores máximos no. En segundo plano, se estima que los valores máximos de las variables inmersas en el contexto hidrológico son parte de la praxis de la campana de Gumbel o alguna similar (Rojo, s.f.a).

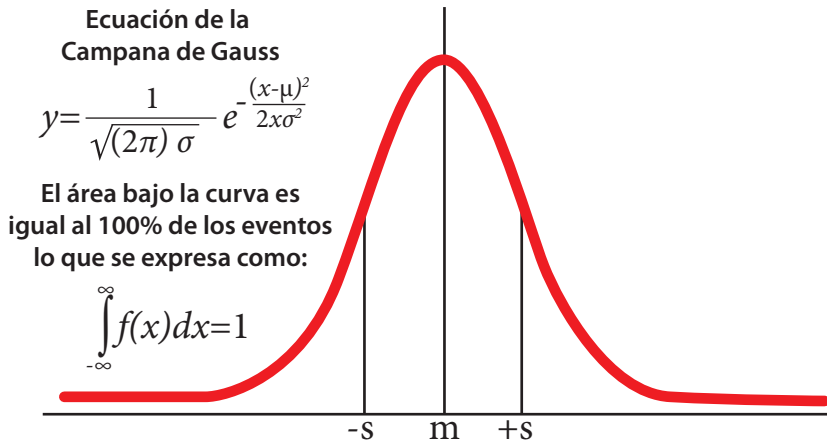
De la misma manera, se puede apreciar en el mundo de la hidrología que las distribuciones de probabilidad utilizadas como principales son las discretas y continuas, las cuales se desdoblán en: a) normal o Gauss, b) log-normal, c) Gumbel (valores extremos), d) log-Gumbel, e) distribución Pearson, f) Pearson tipo III y g) la de Wakeby (Rojo, s.f.b).

### 4.2.1 Normal o Gauss

La normal o Gauss son representaciones que dentro del ámbito de la estadística en hidrología son una de las principales distribuciones de probabilidad de tipo continua, sus denominaciones se le da a la distribución normal o de Gauss, también llamadas simétricas.

Se puede expresar la distribución normal o de Gauss, según la Figura 30:

**Figura 30. Diagrama de Gauss**



Fuente: Gamez (2014).

En este sentido se encuentran una serie de propiedades que se desprenden de la fórmula: a) tiene un máximo en  $x=X$ ; b) es simétrica alrededor de  $X$ ; c) tiende a cero rápidamente si  $[x-X] \gg \sigma$ .

Entre otras propiedades a observar en ámbitos hidrológicos, se encuentra la existencia de valores máximos respecto a la distribución de frecuencias, dado que se halla la distribución normal o de Laplace-Gauss. Pues se conoce que, en los fenómenos hidrológicos, estos no son simétricos, por lo que es importante destacar el análisis de frecuencia, de ello se generan entre otras frecuencias, la denominada distribución normal cuya estructura matemática se establece en la Figura 31:

**Figura 31. Fórmula de distribución normal**

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

Fuente: Guevara y Albano (2006, p. 42).

Entonces, significa que  $x$  es la variable de la serie,  $\mu$  es el promedio aritmético y  $\sigma$  es la desviación estándar.

En definitiva, y según Guevara y Albano (2006), los valores tanto  $\mu$  como  $\sigma$  son parámetros que definen la distribución normal, dado que  $\mu$  es una medida de la tendencia central. Por otra parte,  $\sigma$  representa una variabilidad de la serie, cuya razón se proyecta a ser parámetros con un infinito número de valores y, por lo tanto, se debe transformar la distribución bajo la variable reducida en:

$$t = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

De esta manera, la función podría transformarse como sigue:  $\mu = 0$ .  $\sigma$  quedaría representada como se muestra en la Figura 32.

**Figura 32. Fórmula transformada distribución normal**

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-t^2/2} dt$$

Fuente: Guevara y Albano (2006, p. 42).

Todo lo expuesto, siguiendo las consideraciones de Guevara y Albano (2006), permite observar cómo los valores de  $t$  se encuentran tabulados en variedad de estándares en materia de hidrología y estadística escritos por autores como Guevara, (2006), Chow (1994), Maidment *et al.* (1992) y Benjamín y Cornell (1970) que se refirieron en el mismo sentido (Guevara y Albano, 2006).

En otros escenarios sobre hidrología se menciona que la distribución normal describe fenómenos de caudales totales anuales, siendo la distribución normal una forma de campana de forma simétrica porque el coeficiente de inclinación es igual a 0. No obstante, en los casos de inundaciones la distribución normal no funciona, porque cuando  $Q$  indica un flujo anual, en muchos casos el logaritmo de los flujos de inundación,  $\log Q$ , sí lo es, pero cuando el límite inferior  $C$  resuelve el problema como  $\log/Q-C$  (Arcila y Hurtado, 2013).

Finalmente, tomando las palabras de Argote (2009), “la distribución normal es una de las más utilizadas en estudios que modelan la dinámica social de las poblaciones y está relacionada con los fenómenos naturales” (p. 204). Indica que es esencial cuando se asumen en un historial gran cantidad de datos para su procesamiento, en espacial, en el ámbito hidrológico.

### 4.2.2 Log-normal

El tema del log-normal son categorías que, dentro del mundo de la estadística en hidrología, como lo son las probabilidades, la distribución normal logarítmica es una distribución de probabilidad continua cuya variable aleatoria direcciona logarítmicamente porque está normalmente distribuida, dicha variable aleatoria, junto con una distribución normal, también es denominada “distribución de Tínut”.

Esto significa que la variable puede incluso ser considerada como un producto multiplicativo de muchos otros pequeños factores independientes. Un nuevo aspecto es que, como variable, los valores que no se ajustan a la distribución de Gauss, pero sí sus logaritmos, se les llama de distribución log-normal (Ortiz, 2015). En la figura se expone la fórmula del log-normal.

**Figura 33. Fórmula log-normal**

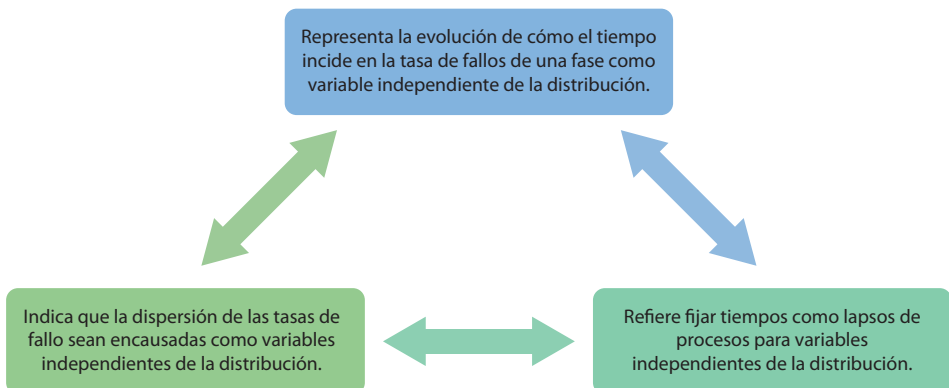
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} e^{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{para } x > 0 \\ 0 & \text{para } x \leq 0 \end{cases}$$

Fuente: Ortiz (2015).

En ese sentido, se tiene el caso de la fiabilidad de la ingeniería que pudiese estar presente en las ciencias hidrológicas donde la distribución estadística es aplicable cuando existen valores diferentes en un contexto de factores.

Esta razón genera que la distribución log-normal tenga como esenciales aplicaciones lo que se muestra en la Figura 34, según Tamborero y Cejalvo (1994).

**Figura 34. Distribución log-normal**



Fuente: elaboración propia con base en datos de Tamborero y Cejalvo (s.f.).



En ese orden de ideas, a partir de lo expresado en la Figura 34, se derivan de los efectos de las variables independientes de la distribución una serie de características que reflejan ser las más significativas de la distribución log-normal; se mencionan a continuación en la Figura 35:

**Figura 35. Características significativas de la distribución log-normal**

a) Pueden obtenerse a partir de los logaritmos de una variable cuando se describen mediante una distribución normal.

A efectos de ejemplo se toma el caso en el que las variaciones en la fiabilidad, cuando son de la misma clase de componentes, generan una representación hacia las tasas de fallos aleatoria en vez de ser una variable constante.

b) Cuando la distribución natural deba ser usada en las desviaciones a partir del valor del modelo.

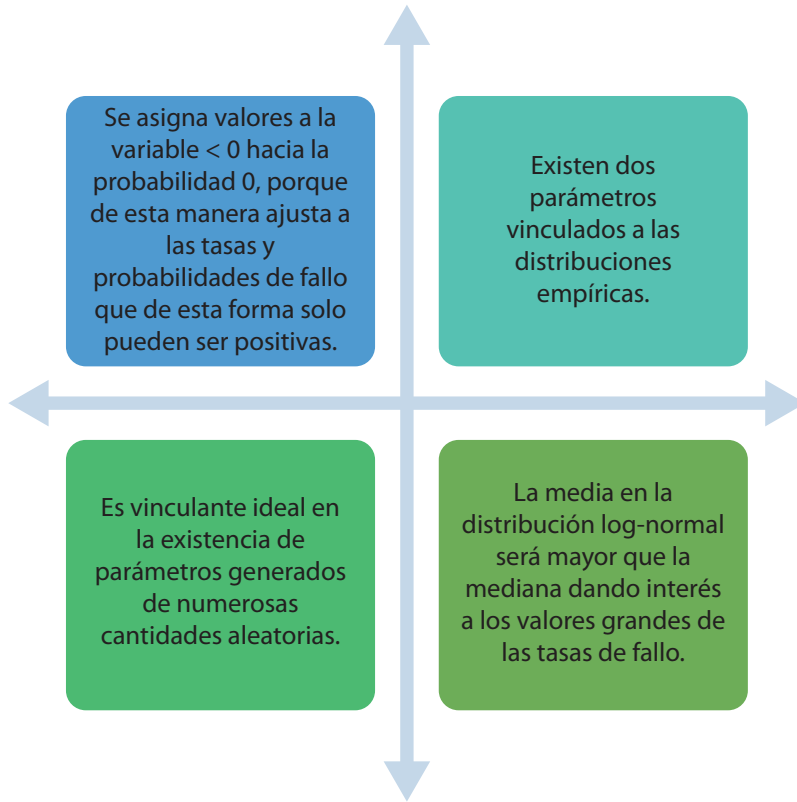
Inciden factores bajo los porcentajes, lo cual indica una serie de valores absolutos para la distribución normal.

c) Cuando se halla la distribución log – normal, cuyo contexto comprende dos parámetros.

Media aritmética y desviación estándar.

Fuente: aplicaciones según Tamborero y Cejalvo (1994).

Asumiendo las características mencionadas en el párrafo anterior se puede inferir que, dentro de estas, Tamborero y Cejalvo (1994) indican que del log-normal se desprenden varias propiedades, entre ellas las presentes en la Figura 36.

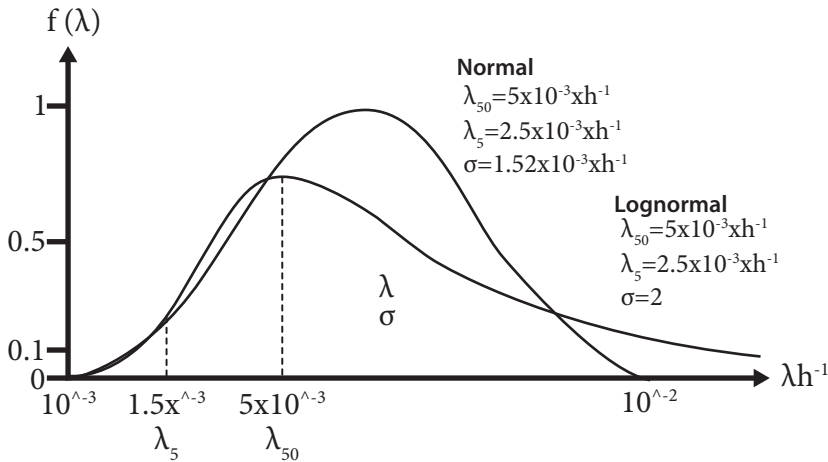
**Figura 36. Propiedades de la distribución de frecuencia log-normal**

Fuente: adaptado de Tamborero y Cejalvo (1994).

Como es de observarse, y en comparación a una distribución normal, aunque sean iguales los percentiles del 5 % y 50 %, como ejemplo de ello se puede apreciar en la Figura 35, donde dichas propiedades derivadas de las características del log-normal se acogen a una gráfica.

Se observa en la Figura 37 que la distribución normal y log-normal permiten su comparación, aunque ambas jueguen con los mismos percentiles a generar resultados en función de la media en la distribución log-normal; cuando esta es mayor que su mediana, da mayor interés hacia los valores grandes de las tasas, mas no así a una distribución normal con los mismos percentiles.

**Figura 37. Comparación entre una distribución normal y una log-normal con los mismos percentiles del 5 % y 50 %**



Fuente: Tamborero y Cejalvo (s.f.).

Según Ortiz (2015), para la modelación de puntos máximos, las principales distribuciones que se utilizan son log-normal, Gumbel y log-Gumbel. Esto es importante porque da luces al investigador en materia de estadística en hidrología para seleccionar la distribución de probabilidades más adecuadas que se adapten a lo que se quiere calcular en función a la ingeniería hidrológica, pero, adicionalmente, señala una serie de consideraciones que deben ser asumidas antes de seleccionarlas, entre estas se encuentran las reflejadas en la Figura 38.

Se evidencia que para una buena elección en materia del método o fórmula que deba ser aplicable en los casos de las distribuciones como los son log-normal, Gumbel y log-Gumbel debe tomarse en cuenta o tener conocimientos sobre consideraciones que, si bien no son frecuentes, permiten el mejor camino a una solución más acertada a las probabilidades estadísticas y así obtener los mejores valores que puedan registrarse a través de la optimización.

**Figura 38. Consideraciones que deben ser asumidas antes de seleccionar la distribución más adecuada al caso hidrológico**



Fuente: adaptado de el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente, 2018).

### 4.2.3 Gumbel valores extremos

La distribución de Gumbel o de valores extremos son distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico, es decir, que dentro de su proceso se toma la distribución general de valores extremos, pues este tipo de distribuciones se ha utilizado ampliamente en los escenarios cuya representación han sido los comportamientos de las frecuentes crecientes y sequías, dadas en la máximas y mínimas cantidades en función de las etapas del año, especialmente, en épocas de invierno y verano producto de las precipitaciones (Ortiz, 2015).

En el trabajo elaborado por Ortiz (2015), la autora menciona que la distribución general de valores extremos es “una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico” (p. 1). Entonces, dependiendo de los

escenarios como los son las crecientes y sequías (máximos y mínimos), se alude que este tipo de distribuciones son ampliamente utilizadas porque representan el comportamiento en el campo hidrológico.

Al respecto Poblete y Vera (2019) generaron una propuesta investigativa donde utilizaron las distribuciones de Gumbel, o valores extremos; en el análisis de frecuencia hidrológico referenciaron el caso de la ocurrencia de heladas tempranas y tardías en un sector geográfico de Argentina. Ambos mencionan que la existencia de eventos extremos en materia de clima presentados con determinada frecuencia e intensidad, pueden producir cuantiosos daños, por ello el uso de la estadística, a través de la recopilación de datos en determinadas fechas, con estimación de las probabilidades de excedencia y tiempo de retorno, y sus ocurrencias.

Así pues, siguiendo con el caso expuesto, mencionan Poblete y Vera (2019) que se toman nota de valores máximos de la variable en intervalos fijos de tiempo en un año, siendo la muestra igual al número de años de registro. Esto significa que deben disponerse de datos de por lo menos veinte años para dar confiabilidad a los resultados, si es menor a diez años, no daría garantía.

Por ello, según Aparicio (1997, como se citó en Poblete y Vera, 2019), en materia de funciones estadísticas, si se tienen  $M$  muestras,  $n$  eventos y  $X$  máximo de  $n$  eventos de cada muestra, entonces, es posible definir que, si  $n$  aumenta, la función de distribución de probabilidad de  $x$  tiende a uno (1).

Por tanto, la función de distribución de valores extremos generalizados se expresa así:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \frac{-x-\beta}{\alpha} - \exp \left( \frac{-x-\beta}{\alpha} \right)$$

Mencionada la expresión matemática-estadística, se conoce que  $a$  y  $b$  son los parámetros de la distribución.

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma \quad \beta = \bar{x} - 0.5722 a$$

Esto significa para Poblete y Vera (2019) que:

[...] donde:  $X$ : Media;  $\sigma$ : Desviación estándar estimadas con la muestra. Para el estudio de series de valores extremos se utilizan diversas distribuciones, [entre ellas] la de Gumbel [o valores extremos, definida en función de] la probabilidad de excedencia (PE) [...] como la que presenta un valor inferior a un umbral dado, es decir:

$$PE \ F(x \leq \text{umbral}) = e^{-e^{-(x-\mu)/\alpha}} \quad \alpha = S_x/\sigma_y \quad \mu = x-\alpha$$

Con:

F(x): Probabilidad de que se presente un valor menor o igual a x.

e: La base de los logaritmos neperianos.

$\bar{x}$ : Media aritmética de la muestra.

$S_x$ : Desviación estándar de la muestra.

$\sigma_y$ : Desviación típica de los datos considerados.

$\mu$ : Parámetro de F. (p. 117-118)

Ante esto, para Poblete y Vera (2019):

[...] los datos fueron originales:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , y se fija un umbral  $u$ . Entonces a los valores  $y_k = x_k - u$ , si  $x_k > u$   $k=1, \dots, n$ , se les llama excedencias [...].

Sea una variable aleatoria  $X$  unidimensional, y sea  $u$  un umbral fijado, se dice que el suceso  $\{X=x\}$  es una excedencia del umbral  $u$ , si se cumple que  $x > u$ .

Por tanto, un periodo de retorno sería aquel tiempo suministrado y transcurrido entre dos umbrales, resultando inverso a la probabilidad de excedencia, es decir, el periodo de retorno es igual a uno entre probabilidad de excedencia:  $PR=1/PE$  (Poblete y Vera, 2019).

#### 4.2.4 Log-Gumbel

El log-Gumbel es una distribución de frecuencia dentro de la estadística hidrológica, cuya serie de elementos que la sustentan como función acumulada son las variables reducidas, el mismo proceso de cálculo de estimación de parámetros y el método de momentos.

Respecto a la función de distribución acumulada se establece como una forma en la cual  $x$  se asume en parámetros de escala, parámetros de posición como valor central o moda, donde una variable  $x$  puede ser reemplazada por  $\ln(x)$ , es decir, llega a convertirse en la función acumulada de la distribución log-Gumbel, o distribución de Fréchet, y toma como forma la siguiente:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}}$$

Ahora bien, cuando se trata el episodio de la variable reducida, esta es aleatoria y se define como  $y$  que es igual a  $\ln(x)$  menos  $\mu$  ( $\mu$ ) entre  $\alpha$  ( $\alpha$ ). Esto indica que la función acumulada reducida log-Gumbel es:

$$G(y) = \text{EXP}(-\text{EXP}(-y)) = e^{-e^{-y}}$$

Respecto al proceso de cálculo de los parámetros de la serie de datos  $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_N$ ; se convierte a sus logaritmos. Posteriormente, se hace el cálculo de la media y desviación estándar.

Por otro lado, la estimación de parámetros, aplicando el método de momentos, sus valores se obtienen de alfa ( $\alpha$ ) y de mi ( $\mu$ ), la cual pertenece a la distribución log-Gumbel. Y cuando se trata de la estimación de parámetros bajo el método de momentos lineales, se convierte en ecuaciones de alfa ( $\alpha$ ) y de mi ( $\mu$ ), pero acá, alfa ( $\alpha$ ) es igual a lambda  $\lambda_2$  entre  $\ln 2$ ; y mi ( $\mu$ ) es igual a lambda  $\lambda_1$  menos 0, 577215664153286  $\alpha$ . Significa entonces que tanto  $\lambda_1$  como  $\lambda_2$  son igual al primer y segundo momento lineal, a cuyo efecto  $y_1$  es igual a  $\ln x_i$ .

#### 4.2.5 Distribución log-Pearson tipo III

Representa en el ámbito de la estadística en hidrología una de la más usadas, y esto porque las variables hidrológicas son sesgadas. Cuando hay o existan variables como el caso de: a) crecientes máximas (anual); b) caudales (mínimos); c) volúmenes de flujo (anual-estacionales); d) valores de precipitaciones (extremas); e) volúmenes de lluvia (corta duración). Todas ellas inmersas en la función de distribución Gamma (posee dos o tres parámetros), cuyo propósito es usarla para efectos de ajustar las variables mencionadas de la distribución de frecuencia (Ramírez *et al.*, 2006).

De la misma manera, Foster, en 1924, fue quien desarrolló el método de log-Pearson tipo III, en cuyo contexto funcional trasforma los valores extremos  $X$ , en el ámbito logarítmico (Ramírez *et al.*, 2006). En el ámbito estadístico de la distribución de frecuencia se da que  $\log X$  es igual a la media de  $\log X$  más  $K$  por  $S_{\log X}$ ; siendo que el valor de  $K$  no solo depende de  $Tr$ , sino que también es función del coeficiente de asimetría  $g$ . Esto último significa que la separación y qué tanto se distancian entre los datos o valores de la distribución con respecto a la normal de Gauss (Foster, 1924; Bolinaga, 1979; Helsel, 1992; citados por Ramírez *et al.*, 2006).

Por consiguiente, en la aplicación del método de log-Pearson tipo III, se permite el desarrollo de varias duraciones de precipitaciones apegadas a los diferentes valores de intensidad aplicando logaritmos, también en los diferentes valores de la media, del mismo modo, la desviación estándar de la muestra y el coeficiente de asimetría. Seguidamente, se concluyen los valores de los factores de frecuencia de  $K$  en periodos de tiempo en años, determinándoseles el antilogaritmo, esto da paso a las intensidades máximas de precipitación (Linsley, 1985 citado por Ramírez *et al.*, 2006).

En ese sentido, se imbrica que la distribución log-Pearson tipo III puede derivarse de su homóloga Pearson tipo III, es decir, así como es obtenida la distribución

log-normal derivada de la distribución normal. Significa que los logaritmos de la variable  $x$  dependen de Pearson tipo III, desde luego esta variable presenta un log-Pearson tipo III y su función de distribución de probabilidades se representa como:

$$P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{|a|x\Gamma(b+1)} \left( \frac{\ln x - c}{a} \right)^b e^{-\left( \frac{\ln x - c}{a} \right)} dx$$

Significa que los elementos constitutivos ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) son los parámetros de escala, forma y localización que constituyen parte de la función Gamma [ $\Gamma(b+1)$ ]. Todo ello indica que log-Pearson tipo III aplicada en hidrología es limitada en virtud de la función de densidad de probabilidades, no, así como distribución cuando [ $a > 0$ ;  $b > 0$ ], generando una forma de campana sin límite superior [ $ec \leq x < \infty$ ] (Rivano, 2004).

También se asume que la estimación de parámetros por máxima verosimilitud no conlleva a solución y se desarrolla bajo el cálculo de la media ( $\mu_y$ ), la desviación estándar ( $\sigma_y$ ) y el coeficiente de asimetría de los logaritmos de la variable  $x$  ( $\gamma_y$ ).

Esta panorámica de la distribución de log-Pearson tipo III puede ser asimétrica en espacio real, positiva o negativa con un espacio logarítmico, lo cual da lugar a no ser apropiada cuando la condición asimétrica es negativa, pues el espacio logarítmico funciona con [ $a < 0$  y  $0 < x \leq ec$ ], cuyos datos en el resultado del análisis de eventos máximos anuales es inapropiado. En estos casos el uso del coeficiente de asimetría en la estimación de parámetros se puede dar a través del método de los momentos mixtos, los cuales conservan la media ( $\mu$ ) y varianza de los datos en espacio real ( $\sigma$ ), y la media de los datos en espacio logarítmico ( $\mu_y$ ) (Rivano, 2004).

#### **4.2.6 Distribución Pearson tipo III**

La distribución Pearson tipo III, también se le denomina distribución Gamma por presentar dos o tres parámetros, representa un alto porcentaje en uso dentro del campo de la hidrología, pues las variables hidrológicas en esta función Gamma se ajustan a una frecuencia de variables. Esta distribución, según Campos (2015), pertenece a las “familias de distribuciones de probabilidad, el cual fue creado por Karl Pearson a finales del siglo XIX” (p. 529).

En este sentido, Matalas y Wallis (1973) comentan que la distribución Pearson tipo III es denominada como “crecientes máximas anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración” (p. 284).

Bajo esta premisa conceptual, se conjuga que una variable aleatoria puede darse en función a una distribución Pearson tipo III, si solo se toman en cuenta las estimaciones de máxima verosimilitud y de momento de los valores de los parámetros de la distribución junto con los valores de las variables en niveles de



probabilidad. Se indica que los resultados extendidos a muestras mínimas son pronunciados a medida que la probabilidad  $[p]$  se vuelve mayor que  $[N/(N + 1)]$  (Matalas y Wallis, 1973).

Ahora bien, la función de la distribución Pearson tipo III se da de la siguiente forma:

$$P(X \leq x) = \int_0^x \frac{1}{a|\Gamma(b+1)} \left( \frac{x-c}{a} \right)^b e^{-\left( \frac{x-c}{a} \right)} dx$$

Esta función procesa su aplicabilidad bajo tres elementos que son  $a$ ,  $b$  y  $c$ , los cuales, como parámetros, representan la escala, la forma y la localización. Además, se observa que la función Gamma ( $\Gamma$ ) se define en todo argumento real positivo que se derive de  $b$ .

Por tanto, la estimación de parámetros para casos donde la escala, la forma y la localización existan es aplicable al método de los momentos, por ser una técnica cuya relación entre parámetros y momentos como la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría logran concebir un resultado apropiado.

Por otro lado, se halla la función de distribución acumulada, la cual sus elementos son parte de una serie de variables tales como:  $x$  = variable aleatoria;  $x_0$  = origen de la variable  $x$ ; parámetro de posición (valor inicial); parámetro de escala y parámetro de forma, para orientar la ecuación siguiente:

$$F(x) = \int_0^x \frac{(x-x_0)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} dx$$

Finalmente, es de destacar que la distribución Pearson tipo III (Gamma de tres parámetros) representa una función versátil de mayor uso, donde es pertinente para los análisis espacio temporales de frecuencias, y se ajusten a los datos de lluvia acumulada en un determinado tiempo (Guttman, 1999; Vicente, 2006; Lee y Wang, 2003 citados por González, 2011).

#### **4.2.7 Distribución Wakeby**

Es una distribución de cinco parámetros que puede adecuarse para series estacionarias con muy fuerte asimetría, cuyas variables son parte de la dinámica de la tendencia en temporalidad y persistencia, más aún cuando se invalidan hipótesis de estacionalidad, siendo versátiles en la estimación probabilística de caudales (Poveda y Álvarez, 2012).

Sin embargo, Wakeby da cabida a ser una función de distribución de probabilidad que describe el comportamiento de la variable hidrológica en cada fenómeno

(Ramírez y Arellano, 2010). También se define como un modelo probabilístico que puede ser adecuado en las representaciones de caudales de crecidas máximas diarias o instantáneas, pero fijadas a una región específica (Houghton, 1978).

En ese orden de ideas, otros autores como Matalas, Slack y Wallis (1975) posicionan a Wakeby como un modelo análogo cuya estructura parte con cinco parámetros, dándole mayor flexibilidad en las muestras representativas del comportamiento. Pero, aun así, logran aproximarse a parámetros estimados en una determinada región, por eso, desde la óptica analítica, su ventaja está abordada al estimar los parámetros, a través del método de los momentos ponderados por probabilidad, es decir, el inverso de su función de distribución acumulada, mas no así para la implementación de otros procedimientos (Cunnane, 1988).

Por tanto, en una distribución de frecuencia hidrológica como Wakeby, se desarrolla bajo una variable aleatoria  $x$  en la relación cuya función de distribución acumulada se representa en  $F: x(F) = \{m + a [1-(1-F)^b] - c [1-(1-F)^d]\}$ . En esta función se desprende que los valores de la variable aleatoria están comprendidos entre  $m$  e infinito, donde se observa que los parámetros del modelo comentado son  $m$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ .

Entre otras de las bondades que Wakeby presenta es que puede llevarse a cabo bajo el método de momentos ponderados por probabilidad, direccionados, para efectos de una muestra limitada en tamaño con máxima verosimilitud dentro del contexto del momento convencional. En otras palabras, la máxima verosimilitud se usa para estimar el tamaño de una población en diferentes escenarios (Romero, 2020).

Finalmente, y tomado en consideración los elementos que constituyen la función de Wakeby, da paso al valor del producto en la variable aleatoria  $x$ , la función de distribución acumulada  $F(x)$  y el complemento en  $1-F(x)$ , conociendo que el orden exponente 1 es unitario, más los otros dos exponentes son nulos (*Método Regional Wak-Mpp*, s.f.). Y todo ello es porque se busca resolver un sistema de cinco ecuaciones dentro de una población cuya muestra emerge de una máxima verosimilitud, y que luego relacionan su ponderación para valores de caudales donde sus ordenados van de manera creciente.

### 4.3 Pruebas de bondad y ajuste

En el contexto hidrológico o en las ciencias de las estadísticas de la hidrología representan una modelación estadística de los extremos hidrológicos. A tales efectos en la praxis estadística, la ausencia del experto y a fines de la determinación de la bondad de ajuste de los modelos, es necesario verificar varias dimensiones: a) la normalidad de los momentos estadísticos residuales; b) el coeficiente de correlación; c) el comportamiento de los gráficos sin tendencia. Significa que, luego del análisis que se realice, se podrá lograr de forma sistemática e informativa el remanente (residuales).

Entonces las pruebas de bondad y ajuste son parte de la modelación estadística de análisis de frecuencias, e inmersa en la praxis del método usado cuyo planeamiento considera la mitigación del riesgo, ante la presencia de inundaciones o sequías. Pero, evidentemente, en los diseños de estructuras hidráulicas o aprovechamiento de recursos hídricos debe asumirse con datos históricos, cuyas inferencias de variables aleatorias pueden generar la hipótesis independiente e idénticamente distribuida (Chow *et al.*, 1994). A estos efectos, se infiere que las muestras inmersas en la hipótesis comentada indican una tendencia de frecuencia frente a los cambios ambientales cuyas variables hidrológicas se comportan en el espacio y tiempo; motivo por el cual el análisis de frecuencia aplica nuevos métodos estadísticos.

## 4.4 Frecuencia de Lluvias

La frecuencia de lluvias abre un abanico de posibilidades en el contexto de la estadística. Según autores como Coras *et al.* (2005), indican que estas se contextualizan como “la repetitividad de eventos de características similares en intensidad y duración” (p. 114). Sin embargo, es de asumir el criterio que, a mayor precipitación, menor será la frecuencia de las lluvias. Se imbrica lo mencionado por IDEAM (s.f.), cuyo reporte en Colombia establece respecto a la intensidad de duración de las lluvias en un determinado tiempo, una frecuencia bajo magnitud de lluvia que puede ser fuerte o débil, expresado en milímetros por hora. Ahora bien, según el tiempo de duración habrá una probabilidad de frecuencia y ésta será expresada en años o periodo de retorno.

Entre otros aspectos a considerar en la frecuencia de lluvias, es su fin, o utilidad, dado que para la elaboración de proyectos de drenaje son válidas y efectivas entre cinco a diez o más años. También es esencial conocerlas para diseños de drenajes superficiales, inundación de cultivos o para evaluar el rendimiento agrícola, bajo el enfoque del análisis de la lluvia máxima ocurrida durante un año o periodo crítico. Por ello se clasifica en dos vertientes: la frecuencia de lluvias totales anuales y la frecuencia de lluvias máximas anuales (IDEAM, s.f.).

### 4.4.1 Frecuencia de lluvias totales anuales

La frecuencia de lluvias totales anuales evaluadas desde el mundo de la estadística en hidrología tiende a responder a los porcentajes de rendimientos del rubro donde se generen, pues se funda en los momentos tales como las dimensionalidades: variedad del rubro, cantidad de rubro, densidad del rubro, nivel de precipitaciones, intensidad del rubro anterior, tipo de suelo, tipo de relieve (Bustamante *et al.*, 2015). En sí, son variables que determinan el nivel o porcentaje de rendimiento en función al efecto de las precipitaciones.

Por ello la frecuencia de lluvias totales anuales permite, desde la óptica de la estadística, tener las apreciaciones en cuanto a las precipitaciones, bien en ascenso

o descenso en función al histórico existente (Bustamante *et al.*, 2015). Así dan lugar a imbricar el análisis de regresión entre las precipitaciones totales anuales, es decir, variable independiente, separadas de los rendimientos obtenidos entre las precipitaciones totales anuales y los rendimientos máximos por año de las precipitaciones.

#### **4.4.2 Frecuencia de lluvias máximas anuales**

En referencia a la estadística en hidrología, para Luna y Domínguez (2013) representa el proceso mediante el cual se logran las estimaciones máximas anuales de precipitaciones en una zona de estudio. Las características que entran a jugar un papel importante son: los momentos, altitud y coordenadas geográficas; donde a través de estimar la media de precipitaciones diarias máximas anuales de las estaciones en estudio, se pueden interpolar para el cálculo del valor puntual respectivo o calcular el caudal pico, en todo caso, para una crecida o hidrograma. También es de interés conocer la duración de la precipitación y así lograr el cociente empírico de lluvias con base en resultados de estudios.

También se destaca el hecho de que la frecuencia de lluvias máximas anuales da lugar a conocer el nivel de concentración a partir de la lluvia diaria máxima como variable climática a los efectos de prevención de inundaciones, tormentas, torrenciales, entre otros, para un año (Siqueira y Ney, 2019). Así pues, los análisis de la frecuencia de lluvias máximas anuales permiten tener una visión espacial-tiempo desde lo cartográfico de la cantidad de precipitación, la cual permite adecuarse al cálculo de estimaciones con métodos y técnicas pertinentes, sin dejar de lado la variabilidad de las precipitaciones en toda el área en estudio para los diversos procedimientos estadísticos.

## Referencias

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa y Grupo Noriega Editores.
- Arcila Zambrano, A. F. y Hurtado Giraldo, G. M. (s.f.). *Análisis de riesgos y costos de las precipitaciones máximas de la estación* [Archivo PDF]. <https://zdocs.mx/doc/guia-1-modelacion-hidrologica-de-cuencas-gpd28q4d3467>
- Argote-Cusi, M. L. (2009). Comparación y evaluación de la distribución del estimador de la tasa global de fecundidad de Bolivia. *Papeles de Población*, 15(62), 201-222.
- Barreto Villanueva, A. (2012). El progreso de la estadística y su utilidad en la evaluación del desarrollo. *Papeles de Población*, 18(73), 1-31.
- Bustamante González, C., Pérez Díaz, A., Rivera Espinosa, R., Marín Alonso G. M. y Viñals Núñez, R. (2015). Influencia de las precipitaciones en el rendimiento de *Coffea canaphora* Pierre ex Froehner cultivado en suelos pardos de la región oriental de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 21-27.
- Campos Aranda, D. F. (2015). Aplicación de la distribución de probabilidad no acotada del Sistema Johnson para estimación de crecientes. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XVI(4), 527-537. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.005>
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Coras-Merino, P. M., Arteaga-Ramírez, R. y Vázquez-Peña, M. (2005). Análisis de frecuencias de lluvias máximas con finos de drenaje superficial local, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 113-120.
- Cunnane, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 100(1-3), 269-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90188-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(88)90188-6)
- Gamez, J. C. (2014). *La herramienta que todos quieren: La campana de Gauss*. Studylib. <https://studylib.es/doc/727213/la-campana-de-gauss>
- Garrido-Pérez, E. I., González, L., Cabrera, J., Rojas-Salvatierra, J., Arias-Pizarro M. I. y M. Tello. (2018). Normal y log-normal: dos distribuciones de frecuencias y una Teoría Neutral Unificada para estudiar los bosques tropicales. *Revista peruana de biología*, 25(2), 179-188. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v25i2.14690>

- González-Camacho, J., Pérez-Rodríguez, P. y Ruelle, P. (2011). Estimación de índices normalizados de lluvia mediante la distribución gamma generalizada extendida. *Tecnología y Ciencias del Agua*, II(4), 65-76.
- Guevara Pérez, E. y Albano, L. (2006). Modelación de la función de distribución de frecuencias de los caudales máximos en la cuenca del río Caroní. *Revista Ingeniería UC*, 13(2), 41-54.
- Houghton, J. C. (1978). The incomplete means estimation procedure applied to flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 14(6), 1111-1115. <https://doi.org/10.1029/WR014i006p01111>
- IDEAM (s.f.). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia - IDF*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>
- Luna Vera, J. A. y Domínguez Mora, R. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes bolivianos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 111-124.
- Matalas, N. C., y Wallis, J. R. (1973). Eureka! Fits a Pearson Type: Distribution 3. *Water Resources Research*, 9(2), 281-289. <https://doi.org/10.1029/WR009i002p00281>
- Matalas, N., Slack, J., Wallis, J. (1975). The regional tilt looking for a relationship. *Water Resources Research*, 11(6), 815-826. <https://doi.org/10.1029/WR011i006p00815>
- Método Regional Wak-Mpp*. (s.f.). [Archivo PDF]. <https://docplayer.es/user/41105879/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). *Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales de Minambiente* [Archivo PDF]. [http://www.andi.com.co/Uploads/Gu%C3%ADa\\_modelaci%C3%B3n\\_Final\\_%20aguasuperficialcontinental.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Gu%C3%ADa_modelaci%C3%B3n_Final_%20aguasuperficialcontinental.pdf)
- Ortiz, P. (2015). Probabilidad y Estadística. *Distribución de las variables aleatorias continuas de Gumbel y Fréchet*. Universidad de Cuenca.
- Ortiz Pinilla, J., Castro, A., Neira, T., Torres, P. y Castañeda, J. (2000). Criterios sobre el uso de la distribución normal para aproximar la distribución binomial. *Revista Colombiana de Estadística*, 23(1), 65-70.
- Poveda, G. y Álvarez, M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, (36), p. 65-76.
- Poblete, A. y Vera, M. (2019). Aplicación de la distribución de valores extremos a eventos geográficos poco frecuentes. Análisis del caso de la ocurrencia de

- heladas tempranas y tardías en el Valle de Tulum, San Juan. *Revista Universitaria de geografía*, 28(1), 113-133.
- Ramírez, A. I. y Arellano-Lara, F. del R. (2010). Una modificación simple y útil del método de la avenida índice. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(1), 69-85.
- Ramírez, M., Ghanem, A. y Lárez, H. (2006). Estudio comparativo de los diferentes métodos utilizados para la predicción de intensidades máximas de precipitación para el diseño adecuado de estructuras hidráulicas. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 18(2), 189-196.
- Rivano Gutiérrez, F. M. (2004). *Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en el diseño de drenaje superficial de tierras agrícolas del sur de Chile*. [Tesis de grado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/far617a/doc/far617a.pdf>
- Rojó Hernández, J. D. (s.f.a). *Análisis de frecuencia en Hidrología* [Diapositiva PowerPoint]. [http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/anlisis\\_de\\_frecuencias\\_ii.pdf](http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/anlisis_de_frecuencias_ii.pdf)
- Rojó Hernández, J. D. (s.f.a). *Análisis de Frecuencias. Expresiones para el cálculo de los eventos para el período de retorno T y de los respectivos errores estándar de estimación requeridos para la determinación de los intervalos de confianza de los estimados de los valores esperados*. [Archivo PDF]. [http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/notas\\_analisis\\_de\\_frecuencias.pdf](http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/notas_analisis_de_frecuencias.pdf)
- Romero, J. D. (2020). *Teoría de probabilidades y máxima verosimilitud aplicada al problema de estimación del tamaño de una población*. [Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. [https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2021-06/Jos%C3%A9%20Daniel%20Romero\\_0.pdf](https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2021-06/Jos%C3%A9%20Daniel%20Romero_0.pdf)
- Sánchez San Román, F. J. (2022). *Apuntes de hidrología e hidrogeología*. Universidad de Salamanca.
- Siqueira, B. y Teixeira-Jonas, Nery. (2019). Análisis de la precipitación diaria en el estado de Paraná. *Mercator - Revista de Geografía UFC*, 18(9). 18030-18041. <https://doi.org/10.4215/rm2019.e18030>
- Tamborero, J. y Cejalvo, A. (s.f.). *NTP 418: Fiabilidad: la distribución log normal*. [Archivo PDF]. [https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp\\_418.pdf/6d691f1b-0e27-4236-a0ce-63766f0cdf5d?version=1.0&t=1614698337476](https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_418.pdf/6d691f1b-0e27-4236-a0ce-63766f0cdf5d?version=1.0&t=1614698337476)





# Fundamentos de Hidrología

*Fundamentos de hidrología* establece las conceptualizaciones base de los conocimientos sobre la hidrología, teniendo en cuenta las dimensiones necesarias para seguir profundizando sobre esta ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en el planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico, e influencia en las actividades humanas.

Está compuesta por cuatro capítulos enfocados de la siguiente forma: 1) Introducción a la hidrología, 2) Las cuencas de drenaje, 3) Precipitaciones y 4) Estadística en hidrología.

Dirigida a estudiantes y profesionales de las disciplinas que abarquen los temas sobre la ciencia que estudia las aguas terrestres.

## Incluye

- ▶ Una estructura básica entendible a todos los niveles académicos
- ▶ Explicación concreta sobre las dimensiones sobre la hidrología
- ▶ Fundamentos básicos sobre hidrología
- ▶ Bases para una ampliación en los diferentes campos del saber

### Nelson Javier Cely Calixto

Ph. D. (c) en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, magíster en Obras Hidráulicas, especialista en Agua y Saneamiento Ambiental e Ingeniero Civil. Docente tiempo completo UFPS. Investigador Junior del grupo de investigación HYDROS. Consultor con experiencia de más de 15 años en proyectos de ingeniería hidráulica y sanitaria.

### Gustavo Adolfo Carrillo Soto

Doctor en Hidrología, magíster en Recursos Hídricos e Ingeniero Civil. Docente-investigador de la UFPS. Director de la Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Director del grupo de investigación HYDROS. Consultor con más de 20 años de experiencia en proyectos de ingeniería hidráulica, hidrología y climatología.

### Carlos Alexis Bonilla Granados

Estudiante de doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiente, magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos Ingeniero Civil, especialista en Patología de la construcción, especialista en Aguas y Saneamiento Ambiental e Ingeniero Civil. Docente de la UniPamplona. Investigador de los grupos de investigación Etenoha, HYDROS y Fluing. Consultor en proyectos de saneamiento básico.



**ETENOHA**  
Grupo de Investigación

