



DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los compromisos adquiridos en el marco del convenio interadministrativo número 198 – 2004/01 (5504/04) suscrito entre el IDEAM y FOPAE, el cual tiene por objeto “Aunar esfuerzos técnico-administrativos para mejorar el conocimiento del clima y ampliar la Red de Monitoreo Hidrometeorológico de Bogotá D.C.”, se desarrolló el presente documento, que tiene como objetivo principal el Diseñar la ampliación de la red Hidrometeorológica del FOPAE con fines de monitorear y conocer el comportamiento de la precipitación y niveles de agua conducentes al pronóstico de estas variables, con el fin de emitir avisos de prevención y alertas tempranas en la ciudad de Bogotá, principalmente en la cuenca del río Tunjuelo.

El diseño de la Ampliación se realizó teniendo en cuenta la siguiente definición, “Los fenómenos hidrometeorológicos se estudian a través de la series de datos obtenidas en sitios o estaciones de medición distribuidos sobre el área de interés y que operan durante un intervalo de tiempo considerable en forma estable”. Los puntos de medición con el instrumental, los protocolos, estándares de medición, cadena de producción, transmisión, almacenamiento y análisis de los datos y el equipo técnico administrativo de operación conforman lo que se denomina la "red hidrometeorológica", la cual debe ser un sistema organizado, dinámico y operable bajo las condiciones específicas en que puede trabajar el organismo que la administra.

Para el desarrollo del diseño de la red se revisó la bibliografía relacionada con los diferentes métodos de diseño de redes hidrometeorológicas, para determinar cual de estas se ajusta a los aspectos técnicos, condiciones del entorno físico, los procesos socio-económicos y los elementos culturales encontrados en la ciudad de Bogotá. Por lo anterior, el tema de diseño y optimización de redes plantea un problema que se debe abordar desde un punto de vista integral, interrelacionando los diferentes aspectos evaluados.

Es importante resaltar que en el área de estudio existen diferentes instituciones con red propia e independiente, lo cual incide dentro de los procesos de estandarización, normatividad en lo referente a su instalación, operación sobre los procesos de observación, adquisición y análisis de información, lo cual conlleva una heterogeneidad en la información en general. En el desarrollo se evaluó las redes hidrometeorológicas de las diferentes entidades, realizando un diagnóstico de éstas y se determinaron los sitios donde las variables de interés no son monitoreadas actualmente. Teniendo en cuenta estos sitios se da una priorización para la ampliación de la red actual del FOPAE, teniendo en cuenta la misión de la Entidad.

Además de la revisión bibliográfica y de las visitas a las redes hidrometeorológicas existentes, se realizó un gran trabajo de compilación, procesamiento y análisis de información, tal como son estudios anteriores, inventario de inundaciones y series históricas de caudal y precipitación de las diferentes estaciones hidrometeorológicas localizadas en el área de estudio. Lo anterior con el fin de tener un conocimiento de las características del área de estudio, los sectores que son vulnerables a inundaciones, la variabilidad de la precipitación y caudales en los diferentes cuerpos de agua. Lo cual es la herramienta básica para el diseño de la ampliación de la red hidrometeorológica con fines de pronóstico de niveles para apoyar a la emisión de alertas tempranas, y que es requerida por el FOPAE.



OBJETIVOS GENERALES

Conocer las actuales deficiencias de la red, para aproximarnos a un mejor ajuste y optimización en pleno con las instituciones, a fin de obtener una información hidrometeorológica más acorde, fiable, veraz y actualizada, en procura de un mejor conocimiento de las diferentes variables y regímenes de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo.

Diseñar la ampliación de la red Hidrometeorológica con fines de monitorear y conocer el comportamiento de la precipitación y niveles de agua conducentes al pronóstico de estas variables, con el fin de emitir avisos de prevención y alertas tempranas en área de la ciudad y cuenca del río Tunjuelo.

1. PERSONAL PARTICIPANTE

IDEAM

Subdirección de Meteorología:

- Maximiliano Henríquez – Subdirector de Meteorología
- Hugo Saavedra – Ingeniero Geógrafo (Funcionario)
- Germán H. Bernal García – Meteorólogo (Contratista)

Subdirección de Hidrología:

- Hebert Gonzalo Rivera – Subdirector de Hidrología
- Eduardo Zamudio – Hidrólogo (Funcionario)
- Efraín Domínguez – Hidrólogo (Funcionario)
- María Constanza Rosero Mesa – Ingeniera Civil (Contratista)

Programa de Operación de Redes:

- Xiomara Sanclemente – Jefe del Programa de Operación de Redes
- Eduardo Esparza – Coordinador de Automatización
- Edgar Blanco – Coordinador del Área Operativa 11
- Ricardo Castellanos – Administrador de Proyecto (Contratista)
- Martha Cadena – Ingeniera Geógrafa (Contratista)
- Jorge Eliécer Moya – Ingeniero Eléctrico (Contratista)

FOPAE

Subdirección de Investigación y Desarrollo

- Guillermo Ávila Álvarez – Subdirector Investigación y Desarrollo
- Diana Arévalo – Coordinadora Grupo de Estudios Técnicos y Conceptos
- Carolina Rogelis – I.C., MsC. (Contratista)
- Jorge Rosas – I.C., MIng. R.H. (Contratista)

2 DISEÑO DE AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROLÓGICA CON FINES DE PRONÓSTICO DE NIVELES PARA EMISIÓN DE ALERTAS POR INUNDACIÓN EN BOGOTÁ D.C.

Para el diseño de las redes hidrológicas las metodologías comúnmente utilizadas fueron desarrolladas en Estados Unidos, Rusia y Canadá, siendo la primera en ser difundida a nivel mundial la de Karasiov. En Colombia dicha metodología ha sido utilizada previamente para realizar los diseños de ampliación y/o optimización de redes hidrológicas de referencia general y específico a nivel nacional¹ y regional^{2 y 3}.

Los diseños previos se basan en el análisis de las condiciones del régimen hidrológico dominante en la región de estudio, es decir, las condiciones hidroclimáticas que en promedio caracterizan a la región de estudio. En el caso de la red hidrológica de Bogotá los requerimientos prioritarios de FOPAE son básicamente el seguimiento y pronóstico de crecientes que ocasionan los desbordamientos de los ríos localizados dentro del Distrito.

De tal modo, que el presente informe plantea un marco teórico para emprender el diseño e implementación de redes hidrológicas con fines de alertas por inundaciones. Abordando los criterios para redes de carácter general y específico, proponiendo criterios objetivos, de viable aplicación práctica, para el diseño y optimización de redes bajo las premisas del régimen hidrológico dominante en la región de estudio durante un evento característico de inundación.

2.1 Generalidades

El tema de diseño y optimización de redes hidrométricas debe incorporar de manera sistemática los aspectos técnicos, las condiciones del entorno físico, los procesos socio - económicos y los elementos culturales predominantes en el dominio geográfico donde se debe realizar el seguimiento hidrológico, es por lo tanto una tarea compleja que regularmente comienza con las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el objetivo de la red?
- ¿Cuáles son sus fuentes de financiación?
- ¿Quiénes son los usuarios potenciales de los datos?
- ¿Qué variables se deben observar?
- ¿Dónde se deben medir las variables definidas?
- ¿Cómo debe ser el programa de observaciones?
- ¿Cuan exactas deben ser las mediciones?
- ¿Por cuánto tiempo debe trabajar la red?
- ¿Cuántos puntos de medición deben ser instalados?
- ¿Cuál debe ser la frecuencia de medición?
- ¿Qué tratamiento analítico debe aplicarse a los datos obtenidos a través de la red?

Estas preguntas permiten formular el diseño de la red hidrológica como una pirámide en la cual interactúan los elementos necesarios para cumplir los objetivos planteados para la red con la disponibilidad económica y en el entorno social existentes (Moss, 1982). Esta pirámide de diseño es del siguiente tipo (Ver Figura 1).

¹ Domínguez, E. D.; Verdugo, N.; Niño, R. "Optimización de la Red Hidrológica Nacional de referencia" IDEAM. 2002.

² Domínguez, E. D.; Niño, R.; Verdugo, N. "Metodología para la optimización de redes hidrométricas. Caso de estudio – área operativa 10". IDEAM. 2000.

³ Domínguez E. "Diagnóstico de la Red Hidrométrica de la Corporación Autónoma Regional del Quindío". IDEAM. 2000. Santa Fe de Bogotá.

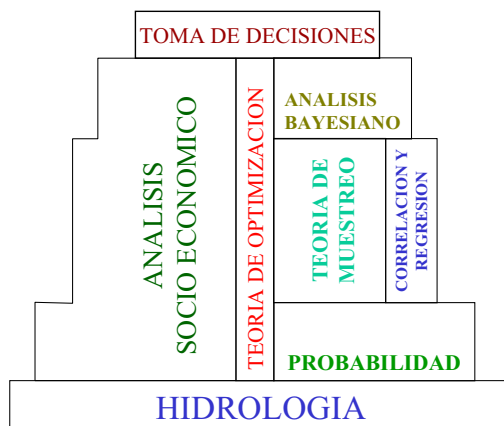


Figura 1. Pirámide de elementos para la optimización de redes hidrométricas

Como se observa, la base del diseño es la hidrología, en la cual reposa todo el conocimiento que se tiene del medio físico y de los procesos que en él ocurren. Del lado derecho de la pirámide se encuentra el aparato matemático en el que se apoya el diseño y del lado izquierdo está el ambiente socio económico en el que transcurre la actividad de diseño. Como eje central actúa el aporte de la teoría de optimización, el cual sirve de enlace entre el diseño teórico y la realidad del entorno.

La parte superior, "toma de decisiones", representa un mecanismo formal para la integración de todos los componentes subyacentes. Es importante subrayar, que dada la complejidad del proceso, los conceptos que se presentan a continuación no pueden abarcar todo el contexto de la pirámide, sin embargo si reflejan una parte importante de ella (hidrología, probabilidad, teoría de optimización, correlación y regresión).

2.2 Descripción de algunos métodos para diseño y optimización de redes hidrológicas

Algunos de los métodos de optimización para redes hidrológicas, considerados los iniciales y los principales, son planteados por los autores que se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Algunos Métodos de optimización de la red Hidrológica⁴

No.	PAÍS	AUTOR	AÑO
1	URSS	Velikanov M.A., Ivanov P.V.	1940
2	USA	Eagleson P.S.	1965
3	URSS	Karasiov I.F.	1968
4	Canadá	Solomon S.I.	1968
5	USA	Moss M.E.	1970
6	URSS	Alekciev G.A.	1971
7	USA	Moss M.E., Karlinger M.R.	1974
8	Canadá	Villeneuve J.P., Morin G., Bobee B., Leblanc D.	1979
9	USA	Tasker G.D., Moss M.E.	1979
10	USA	Stedinger J.R., Tasker G.D.	1985

Las expresiones matemáticas de los métodos más relevantes se presentan en la Tabla 2 junto con algunas recomendaciones para su aplicación.

⁴ RIVERA H, "El Monitoreo ambiental en la República de Colombia con énfasis en hidrología", Pág. 27, 1999

Tabla 2 Breve descripción de las expresiones matemáticas de los métodos de optimización⁵

No	Algunas expresiones matemáticas	Descripción de parámetros
1	$F = 100 \cdot (1 + n)^3$ $L = (10 \cdot F)^{1/2}$	<p>F – Área aferente a la estación hidrométrica n – Número original de la estación hidrométrica L – Longitud de la corriente hídrica hasta la estación hidrométrica</p>
3	$Sr = 2.2 \ln Q_0 + 6.35; R^2 = Sb; Q_0 = (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i) / (i + 1);$ $Q_{O_{reg}} = (1/F) \sum_{j=1}^i F_j \cdot Q_{Oj}$ $Grad Q_{O_{reg}} = (1/F) \sum_{j=1}^i [Q_{j+1} - Q_j] / l_i$ $Cv = \sigma_0 (i)^{1/2}; F_{min}; r(l) = 1 - a \cdot l;$ $F = \sum_{j=1}^i F_j; L = 2(F)^{1/2}; l = 0.5L; \sigma_0 = 0.05;$ $\sigma_{GradQ_0} = (2)^{1/2} \sigma_0 Q_0;$ $A = 1/L_0 = 1/1600Km;$ $\sigma_{O_{interp}}^2 = (1/2)(Cv a l + \sigma_0^2);$ <p>1) $F_{grad} = [8\sigma_0 / (Grad Q_{O_{reg}})^2] [Q_{O_{reg}}]^2;$ 2) $F_{correl} = \sigma_0^4 / a^2 Cv^4;$ 3) F_{repres}. Se obtiene mediante la función de $Q_0 = f(F);$ $F_{reires} < F_{optima} < F_{corre};$</p> <p>La cantidad óptima de estaciones se define como la relación entre el área de la cuenca y el área óptima obtenida.</p> $N_{optima} = F_{cuenca} / F_{optima}$	<p>Sr – Orden de la corriente hídrica (según Horton); Q₀ – Caudal promedio multianual; R²-Sr – Cantidad de afluentes de orden Sr; Q₁ + Q₂ + ... + Q_i – Caudal anual; Q_{0 reg} – Promedio multianual en la región de estudio; F – Área de la región (cuenca); Q_{0j} – Caudal promedio multianual (norma) del área F_j; Grad Q_{0 reg} – Gradiente del Q_{0 reg} ; Q_j – Caudal promedio multianual de la isoyeta j; l – distancia entre los centros de gravedad de cada subcuenca; Cv – coeficiente de variación; σ₀ – error de la estimación de la norma; σ – error aleatorio relativo en la estimación de la norma según la hidrométrica; L₀ – distancia en la cual la función de correlación espacial cruza en el eje (de la distancia entre los centros de gravedad) el valor nulo; σ_{GradQ₀} – error medio cuadrático del gradiente del Q₀; σ_{O Interp.}² – error relativo de la interpolación. F_{grad} – criterio que establece la variación espacial del caudal; F_{correl} – criterio que establece la correlación en la variación espacial; F_{repres} – criterio que establece la variación espacial teniendo en cuenta las condiciones zonales y azonales en la región de estudio.</p>
6	<p>Para la interpolación óptima de la variable es necesario conocer:</p> <p>1) $Q_i = (1/N) \sum_{j=1}^N Q_{ji}; j = 1, 2, \dots, L$</p> <p>2) $\sigma_{Qj} = \frac{\sigma_{Q_i(N)}}{\sigma_{Q_u(N)}} = \frac{1}{\sigma_{Q_u(N)}} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{ji} - Q_j)^2}{N - 1} \right\}$</p> <p>$\sigma_{Q_u(N)} = \Phi^{-1}(Pm) \equiv F(Pm)$ de la Función de distribución integral normal</p> <p>$Pm = \left(\frac{1}{[2\pi]^{1/2}} \right) \int_{-\infty}^{U_m} e^{-(u^2/2)} du = \Phi(Um);$ y empírica $Pm (m - 2.5)/(N + 0.5); m = 1, 2, 3, \dots, N;$</p> <p>3) $r_{jr} \equiv r_{Q_i Q_k} = \frac{1}{N_{jk} - 1} \sum \left[\frac{Q_{ji} - Q_j}{\sigma_{Q_j}(N_{jk})} \right] \left[\frac{Q_{ki} - Q_k}{\sigma_{Q_k}(N_{jk})} \right]$</p>	<p>El proceso de interpolación se expone para diferentes formas de ubicación de las estaciones (circular, cuadrática, triangular).</p> <p>Q_j – promedia multianual de la variables hidrológica; N – cantidad de años de observación; σ_{Qj} – Desviación promedio estándar corregida de los valores promedio; r_{jr} – Coeficiente par de correlación empírica</p> <p>(Solo esta información esta disponible).</p>

⁵ RIVERA H, “El Monitoreo ambiental en la República de Colombia con énfasis en hidrología”, Pág. 49, 1999

Tabla 2. Breve descripción de las expresiones matemáticas de los métodos de optimización⁵

No	Algunas expresiones matemáticas	Descripción de parámetros
7	<p>Se aplica el análisis de regresión (logarítmica) para obtener las características estadísticas de la variable hidrológicas. $X = aB_1^{b_1} B_2^{b_2} \dots B_n^{b_n}$; $\text{Log}(\mu_i) = \theta + \beta \log A_i + \delta_i$; $\delta_i = (1 - R^2)^{1/2} \sigma_{\mu} \epsilon_i$; $\gamma = (1 - R^2)^{1/2} \sigma_{\mu}$; $f(A) = [A (\log A_i - \log A_0)]^{-1}$; $\hat{Y}_{\mu} = \frac{Cv^2}{\exp(S_{\mu}^2) - 1}$; $\hat{Y}_{\mu} = \frac{1}{2 \exp(S_{\sigma}^2)}$ $S_{\sigma}^2 = E\left((W - \hat{W})^2\right)$</p> <p>Mediante un análisis especial de selección de parámetros como Cv, γ, N_B, N_Y, ρ_s, ρ_c se obtienen las isopletras de los promedios de Y_i, \hat{Y}_j mediante la relación de "Longitud promedio del registro = f(número de cuencas calibradas)".</p> <p>Para determinar la distribución de probabilidad común de los años equivalentes que no están condicionados por los valores de Cv, γ, ρ_s, ρ_c, el condicionamiento es liberado al tomar la suma parcial de distribuciones condicionales.</p> $P(Y_i, \hat{Y}_j N_B, N_Y) = \sum P(Y_i, \hat{Y}_j / N_B, N_Y, \Phi_i) P(\Phi_i);$ $P(Y_j \geq L) = \alpha$ <p>En donde, $P(\cdot \cdot)$ – es la distribución de probabilidad de años equivalentes que esta condicionada por cada uno de los parámetros ubicados a la derecha de la barra vertical.</p>	<p>X – Una estimación de un parámetro estadístico de la escorrentía (promedio u otro); B – Son parámetros que describen el área de drenaje de la corriente de sitio para el cual la estimación se realiza; a, b1, b2, bn – Son coeficientes definidos mediante el análisis de regresión basado en la información colectada en las estaciones; μ_i – parámetro de la escorrentía en la estación i; θ – es la intercepción de la relación logarítmica; β – es su pendiente; A_i – es el área de drenaje hasta la estación i; δ_i – componente aleatorio agregado al modelo básico para conservar la variación de μ. R – coeficiente de correlación entre $\log(\mu_i)$ y $\log A_i$; ϵ_i – variable aleatorias independiente; A_0 – mínima área de interés en la región; \hat{Y}_{μ} – valor aparente de los años de registro con respecto al caudal promedio S_{μ} – desviación estándar del error de predicción; E – operador de la esperanza, relaciona a la población entera del área de drenaje [f(A)]; W – valor verdadero del logaritmo del parámetro j; N_B – Cuenca hipotéticamente calibradas; N_Y – Longitud del registro de caudales; ρ_s – Coeficiente de correlación serial; ρ_c – Coeficiente de correlación cruzada entre estaciones; \hat{Y}_j – valor aparente de los años de registro, indica que para una longitud fija de registros N_Y un incremento en el número de estaciones N_B causa una disminución en la información; Φ_i – es el i-esimo vector de valores de los parámetros Cv, γ, ρ_s, ρ_c; α – nivel de confianza (grado) L – nivel de información; $P(Y_j \geq L)$ – La probabilidad del evento contenido en el paréntesis.</p>

Tabla 2. Breve descripción de las expresiones matemáticas de los métodos de optimización⁵

No	Algunas expresiones matemáticas	Descripción de parámetros
10	<p>Este estudio inicial compara (mediante el Método de Monte Carlo) las ventajas de la aplicación de las diferentes variantes del método de los mínimos cuadrados (ordinario, parcial y generalizado) para efectos de generar una red hidrométrica, partiendo de la relación existente entre la escorrentía superficial y los factores biogeográficos.</p> $E[\hat{W}] = 0; E[(\hat{W} - W)(\hat{W} - W)^T] = \Sigma(\hat{W});$ $\Sigma(\hat{W})_{ij} = \left[\frac{\sigma_i^2 [1 + Kp^2(k-1)/4]}{n_i} \right]; i \neq j$ $\Sigma(\hat{W})_{ij} = \left[\frac{(\rho_{ij} m_{ij} \sigma_i \sigma_j)}{n_i n_j} \right] [1 + \sigma_{ij} Kp^2(k-1)/4]; i \neq j$ $\sigma_{ij} = E[(X_{it} - \mu_i)(X_{jt} - \mu_j)] / \sigma_i \sigma_j;$ $\Sigma(\hat{W})_{ij} = \sigma_i^2 [1 + Zp/2] / n_i; i = j;$ $\Sigma(\hat{W})_{ij} = \left[\frac{(\rho_{ij} m_{ij} \sigma_i \sigma_j)}{n_i n_j} \right] [1 + \rho_{ij} Zp / 2]; i \neq j$ $W_i = \alpha + \beta \ln A_i + \epsilon_i; W = \Xi \beta + \epsilon;$ $\Xi = \begin{bmatrix} \ln A_1 \\ \dots \\ \ln A_n \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}; \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \dots \\ \epsilon_n \end{bmatrix};$ $E[\hat{W}] = \Xi \beta; E[(\hat{W} - \Xi \beta)(\hat{W} - \Xi \beta)^T] = \Lambda (\gamma^2) = \gamma^2 I_N + \Sigma(\hat{W})$	<p>La tarea de regresión hidrológica se puede manejar como: en cada sitio i ($i=1, 2, \dots, N$) con un valor anual n_i de escorrentía X_{i1}, \dots, X_{in}; se asume que los valores observados de escorrentía son aleatorios e independientes (carecen de memoria)</p> <p>\hat{W} – un estimador del promedio y desviación; W – vector de los valores verdaderos de las características de la escorrentía ya sea en el sitio de interés, su desviación, etc.; $\Sigma(\hat{W})$ – matriz covariable aleatoria del vector \hat{W}; σ_i – desviación estándar; Kp – factor frecuencial asociado al percentil en la distribución X; k – coeficiente de curtosis de la distribución X m_{ij} – número de observaciones concurrentes en los sitios i y j; μ_i – promedio de la variable en el sitio i; Zp – es el 100p percentil de la distribución Standard normal según Moos; A_i – área de drenaje de la estación; ϵ_i – magnitud (aleatoria y normal), cuyo promedio es nula y con variación γ^2; γ^2 – error variable del modelo; I_N – es la $N \times N$ matriz de identidad;</p> <p>El análisis realizado al método de los mínimos cuadrados mediante el Método de Monte Carlo, demuestra las grandes ventajas del mínimo cuadrado generalizado sobre los otros dos y, por ello, en adelante se recomienda utilizarlo en la planeación y optimización de la red hidrométrica, surge entonces el nuevo enfoque del "Análisis de la Red usando el mínimo cuadrado generalizado", el cual es el mejorado posteriormente y defendido por los expertos internacionales que han participado en el proyecto de comparación internacional. Es de advertir que este método al igual que los anteriores entrega resultados no favorables en las regiones montañosas.</p>

Cada uno de estos autores ha basado sus métodos en planteamientos, observaciones y recomendaciones, y algunas de ellas son las siguientes:

- La red debe orientarse según la zonalidad y azonalidad de las variables hidrológicas, es decir, debe existir dos tipos de redes: la primera se entendería como la red básica y se encargará de medir las variaciones de región a región de las características (promedio multianual, hidrógrafa normal, coeficiente de variación, asimetría, lámina de evaporación, promedio multianual de sedimentos y otras) de cada variable hidrológica, de tal modo que permita responder por el balance hídrico, los aspectos térmicos y los sedimentos. La segunda, "red especial" la cual debe responder por la variación azonal (causada por factores locales) de las características (Velikanov M. A.).
- Ivanov P. V., demuestra que la red básica debe ser la segunda, pues el régimen de un río se determina por factores como la caudalidad, pendiente del tramo, composición del lecho y bancas, factores climáticos y antropogénicos. Por ello, un criterio válido a tener en cuenta es el área de la cuenca y la longitud de la red hídrica. Partiendo de este enfoque, demostró que ríos con una longitud menor a 90 Km no tendrá estaciones básicas, puesto que su conocimiento se puede obtener mediante el análisis hidrológico con ayuda de estaciones completarias (el tercer tipo de red).
- El trabajo del diseñador consiste en determinar la vida de la estación necesaria (intervalo de tiempo a operar), frecuencia de medición, grado error y la calidad de los datos a obtener dependiendo del objetivo. (Moss Marshal E.)

- Moss M. y Karlinger M. establecen una relación óptima entre la vida de la estación y la cantidad de estaciones mediante el Método de Monte Carlo.
- La estimación de una variable hidrológica se puede realizar mediante la instalación de una estación, interpolando o extrapolando su valor o empleando ambas opciones; donde cada opción tiene sus propias ventajas. (Villeneuve J-P, Morin G., Bobee B., Leblanc S.)
- El proceso hidrológico (se refiere a la escorrentía superficial) es dinámico, gobernado por diferentes factores, variando espacial y temporalmente; este se puede interpretar mediante el concepto de campo estocástico sobre un territorio. (Villeneuve J-P, Morin G., Bobee B., Leblanc S.)

Las metodologías propuestas por los autores anteriormente mencionados sólo se recomiendan aplicar en territorios que pueden ser interpretados como campos estocásticos homogéneos. Los métodos como Square GRID y KRIGING mediante una reestructuración permiten solventar estos problemas para las regiones montañosas, pues son débiles. (H. Rivera, 1999)

De los planteamientos más sobresalientes son los propuestos por la metodología creada por Karasiov en 1968. Dicha metodología se basa en criterios científicos sustentados en la física del proceso hidrológico y nace a raíz de los logros alcanzados por diferentes científicos en el área meteorológica, geomorfológica, hidrométrica y otras. Además, es uno de las primeras metodologías que se difunde a nivel mundial. Veamos sus planteamientos:

- La clasificación de hidrogramas realizada por Kuzin⁶ es primordial para abordar la optimización de la red hidrológica.
- La evolución de la red de corrientes hídricas obtenidas por Horton describen el proceso mediante el cual se forman los ríos y existe una relación entre la densidad de la red y la densidad de drenaje.
- La mejor herramienta para estimar los valores de caudal en un sitio que carece medición es la interpolación óptima deducida por Gandin.
- El proceso hidrológico se puede interpretar mediante la teoría de probabilidades.
- Los criterios para ubicar puntos de observaciones de las aguas subterráneas son vitales en la planificación de una red hidrométrica.
- Existen tres clases de redes hidrométricas: la operativa, la estacionaria y la especial.
- Presenta tres criterios científicos: el correlativo, el gradiental y el área representativa.

Otro método es propuesto por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), cuyos criterios son el resultado del consenso de expertos sobre la materia y supedita la densidad mínima de estaciones a las características físicas y demográficas de la región a analizar. De tal manera que la selección final de un valor adecuado de la densidad mínima dentro del rango será hecha por el hidrólogo de acuerdo a su criterio

⁶ En 1965, Kuzin P.S. presenta una metodología para abordar en la práctica la regionalización del territorio de la URRS según el proceso hidrológico. Uno de sus principales resultados es la clasificación minuciosa de los hidrogramas de la región montañosa.

y experiencia en concordancia con el desarrollo económico y demográfico de la región. Este método es muy útil como primera aproximación; sin embargo su extrapolación puede inducir a errores.

Los valores de la densidad mínima para algunos tipos de estaciones hidrométricas junto con sus limitantes se indican a continuación:

- Estaciones de flujo fluvial (aforo)

Las densidades mínimas para estaciones de flujo fluvial (aforo) se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Densidades mínimas recomendadas de estaciones de flujo fluvial⁷

Unidad fisiográfica	Densidad mínima por estación (Superficie en km ² por estación)
Zonas costeras	2 750
Zonas montañosas	1 000
Llanuras interiores	1 875
Zonas escarpadas/ondulantes	1 875

La OMM recomienda además que un número suficiente de estaciones de flujo fluvial deberían estar ubicadas: 1) A lo largo de las ramificaciones principales de las grandes corrientes para permitir la interpolación de la descarga entre las estaciones. 2) En función de consideraciones topográficas y climáticas. 3) A una distancia tal que la variación del flujo entre dos puntos de monitoreo pertenecientes al mismo río sea mayor al límite de error de medición en la estación. 4) En un afluente cuyo flujo sea de especial interés. 5) En canales, embalses o en sitios donde se ha previsto la construcción de grandes obras hidráulicas cuando se requiera obtener la información para reconstruir los flujos naturales. 6) En los tramos mas bajos de los ríos principales del país. 7) Donde fluyen ríos de las montañas y sobre los puntos de extracción de agua de riego.

- Estaciones de Nivel de ríos

La red mínima requiere observaciones de nivel de agua adicionales a las que se encuentran implícitas en las estaciones de aforo, por ejemplo: 1) en los ríos que atraviesan las grandes ciudades con fin de conformar un sistema de alertas tempranas por inundaciones. 2) en los grandes ríos, entre estaciones de aforos de caudales, los registros de niveles de río pueden ser utilizados para el estudio de la propagación de las crecidas y su predicción.

- Estaciones de Nivel de lagos y embalses

El nivel, la temperatura, el oleaje, etc., deberían ser observados en estaciones situadas en lagos y embalses con una superficie superior a 100 km². Como en el caso de los ríos, la red debería muestrear también algunos lagos y embalses más pequeños.

⁷ “Guía de prácticas hidrológicas adquisición y procesos de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones”, OMM-No. 168, Quinta Edición, 1994.



2.3 Modelo conceptual para el diseño de la red hidrológica

2.3.1 Criterios para la instalación óptima de estaciones⁸

2.3.1.1 Clasificación de la red

No existe una clasificación estándar de las redes, éstas se encasillan siguiendo diversos criterios, ya sea de acuerdo al periodo de operación, al tipo de parámetros observados o al uso que se le dará a los datos. Normalmente el periodo de observación (permanente o temporal) y el tipo de parámetros observados categorizan al punto de medición dentro de un sistema de protocolos de observación, en tanto que el uso que se le da a los datos es un rasgo que por lo general caracteriza a toda la red, por ello según la finalidad misma de la red las estaciones se pueden clasificar en:

2.3.1.1.1 Estaciones de Régimen General:

Destinadas a suministrar la información básica para el estudio, al nivel regional, de las variables en observación; sustentan la aplicación de los principios de generalización a zonas con características hidroclimáticas homogéneas. Son de carácter permanente y proporcionan la base para estudios estadísticos, de regionalización y caracterización. Estos nodos soportan actividades de planeación a mediano y largo plazo y para extensiones territoriales que se consideran homogéneas en su régimen hidroclimático.

2.3.1.1.2 Estaciones de Régimen Específico:

Se utilizan para obtener información que permita describir el comportamiento específico de zonas que cuentan con características anómalas al régimen general o en las cuales es necesaria una administración más detallada del recurso. Por ejemplo, zonas donde existe alta presión sobre el recurso, con condiciones fisiográficas especiales y/o características geológicas o hidrogeológicas particulares. Estas estaciones pueden ser permanentes o temporales y ocasionalmente pueden ser utilizadas para evaluar relaciones con las estaciones de régimen general.

Los criterios de optimización para una red de referencia de régimen general y otra de régimen específico difieren y por ende siempre es necesario definir con claridad el propósito de la optimización. Es necesario aclarar que los dos tipos de redes no discrepan entre sí y que para el caso del Distrito Capital la red hidrométrica debe contener los dos tipos de estaciones, dada la compleja configuración de su red hídrica.

2.3.1.2 Formulación de criterios para estaciones de régimen general

En principio, la localización óptima de las estaciones de la “red de referencia” consiste en la definición de la densidad de nodos de observación, necesaria para reflejar en forma confiable la realidad, invirtiendo adecuadamente los recursos económicos disponibles para la instalación y operación de la red.

De acuerdo a lo expuesto, una red integral debe contener estaciones de régimen general y de régimen específico. A continuación se formulan los criterios para determinar la densidad y ubicación para ambos tipos de estaciones.

⁸ Domínguez E. et al, 2005: Criterios de optimización de Karaziov aplicados a la red hidrológica colombiana – Número 13, 22 Págs. Medellín.

La respuesta unívoca a la pregunta sobre las dimensiones óptimas de la red de referencia sólo se puede obtener a través de criterios físico - económicos que incorporen el margen de error con el cual se quiera reflejar la realidad. Este reflejo debe describir el campo de variación de la variable hidroclicmáticas y su relación con los factores físico-geográficos.

Cualquier campo físico tiene como características principales su potencial y su tensión; el potencial representa la capacidad para trasladar masa o energía de un punto a otro y la tensión es un índice del desequilibrio existente entre las fuerzas externas que influyen sobre el campo físico. Dado que el potencial varía de un punto a otro en el espacio y además está relacionado con la tensión del campo, se produce un gradiente variable en el espacio.

Una variable definida a través de la noción de campo físico se puede describir como un funcional del siguiente tipo:

$$Y = f(\xi, C_v, gradY, r(l), \sigma) \quad (1)$$

Donde	Y	–	Variable en estudio
	ξ	–	Dirección del gradiente
	C_v	–	Coficiente de variación de Y
	$gradY$	–	Gradiente de Y
	$r(l)$	–	Correlograma espacial de Y
	σ	–	Error de definición de la norma de Y

Teniendo en cuenta que la descripción del campo "Y" se formula en función de su variación espacial, el proceso en estudio se puede representar a través de la conjugación de dos componentes, uno de cambio suave (deriva) y otro de cambio rápido (componente estocástico), por ende la optimización de la red de referencia debe considerar estos dos elementos. La deriva representa el cambio suave por gradiente y la componente estocástica el cambio rápido o variación local (instantánea) del proceso; además la deriva corresponde a la esperanza matemática de "Y" (Norma del proceso) mientras que la componente estocástica se refleja en el coeficiente de variación.

La evaluación del número óptimo de estaciones de la "red de referencia" consiste en la definición de la densidad de nodos de observación, necesaria para reflejar en forma confiable la variabilidad espacial y temporal. Las dimensiones óptimas de la red de referencia se pueden obtener a través de criterios físicos que incorporen el margen de error con el cual se quiera reflejar la realidad. Este reflejo debe describir el campo de variación de la variable hidroclicmática y su relación con los factores físico-geográficos, para ello Karasirov (Karasirov, 1968) propone los siguientes criterios:

2.3.1.2.1 Criterio del gradiente

Al fijar una red de referencia se cuenta con un número discreto de nodos de observación separados unos de otros por una distancia " l " (radio de acción) o por una diferencia de áreas de cobertura " ΔA ". Teniendo en cuenta que ningún método de observación (medición, estimación) está libre de error sistemático, es necesario que los nodos de observación estén distanciados de forma tal que el incremento registrado por las mediciones en nodos vecinos supere en magnitud el margen de error con que se realizan las mediciones.

Tomando como ejemplo la esorrentía, si en un primer nodo de observación se registra una magnitud Y_1 , el nodo subsiguiente debe ubicarse de manera que las mediciones capturen un incremento $\Delta Y(\xi)$ de magnitud superior al error " σ " de la medición de la esorrentía.

En la Figura 2 se observa una red de referencia donde se aplica una tecnología de medición con un error $\sigma = \pm 15\%$; teniendo en cuenta los principios del criterio de gradiente se puede concluir que el segundo nodo es innecesario porque el incremento de "Y" a esa distancia es de 10 mm y está dentro del margen de error de la medición ($\pm 15\%$). De esta manera el nodo 2 captura la misma información que el nodo 1 y por ende lo está duplicando.

La formulación matemática del criterio del gradiente se desprende de la definición de este mismo y tiene en cuenta que para dos nodos vecinos el incremento de "Y" debe superar dos veces el error sistemático de su medición; así, el incremento " ΔY " entre dos nodos de observación separados por una distancia " l " (entre centro ideas) debe ser:

$$\Delta Y(l) = l \text{ grad}(Y) \geq 2\sigma \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{Cv}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

Donde N – Número de observaciones
 Cv – Coeficiente de variación

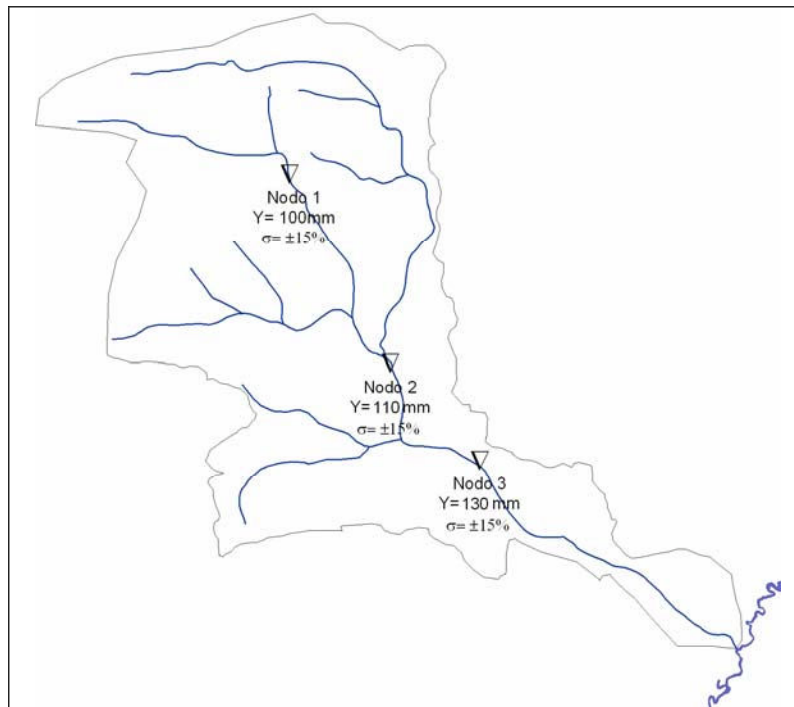


Figura 2. Explicación del Criterio del Gradiente

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene que el área de gradiente se estima como:

$$A_{grad} \geq \frac{8\sigma^2 Y_0^2}{(grad(Y))^2} \quad (4)$$

Donde A_{grad} – Área aferente necesaria para que el incremento de "Y" sea mayor que el margen de error de la medición
 Y_0 – Norma de Escorrentía
 $grad(Y)$ – gradiente de Y

Para obtener un campo de gradiente en forma ágil y objetiva, se puede aplicar el operador de gradiente, cuya forma para un campo en tres dimensiones es:

$$\nabla(Y) = \frac{\partial Y}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial Y}{\partial Z} \quad (5)$$

Usualmente, las herramientas de soporte en Sistemas de Información Geográfica cuentan con procedimientos numéricos para la versión bidimensionales del operador (5), un ejemplo de ellos es el implementado en el programa Surfer for Windows (Golden Software, 1995) que utiliza un esquema de diferencias finitas de cinco puntos para generar una grilla de gradiente utilizando como información de entrada una grilla de escorrentía anual.

2.3.1.2.2 Criterio correlativo

Hasta el momento se ha definido la distancia (área) mínima que debe existir entre dos nodos de observación, pero es necesario determinar, también, que tanto se pueden alejar los puntos de observación uno del otro para mantener la memoria del proceso. Para tal efecto es necesario cumplir con el criterio correlativo, el cual define la distancia máxima que puede existir entre nodos de observación para que no se pierda la memoria espacial entre los nodos de monitoreo. Este aspecto es importante dado que el sistema de monitoreo funciona con fallas por operación y bajo el riesgo de fenómenos naturales que pueden imposibilitar funcionalmente a los nodos de medición. Para que sea posible restituir la información que se pierde durante un periodo de "falla" es necesario que los nodos funcionales durante ese intervalo de tiempo permitan restituir la información no medida en los nodos no funcionales. Para que esta restitución sea posible, la correlación estadística entre los puntos de monitoreo debe ser aceptable.

El criterio correlativo se apoya en la función de autocorrelación espacial (véase Figura 3), de la cual se obtiene el radio correlativo " l_o " que representa la distancia a la cual se pierde todo tipo de correlación entre las estaciones. Este criterio también considera el error máximo que se comete al interpolar los valores medidos en dos puntos separados por la distancia l_o .

Teniendo en cuenta esos dos factores la expresión para el cálculo del área correlativa es la siguiente:

$$A_{\text{correlativa}} \leq \frac{\sigma^4}{a^2 C_v^4} \quad (6)$$

- Donde $A_{\text{correlativa}}$ – Área correlativa, después de la cual se pierde la conexión estadística entre estaciones
- C_v – Coeficiente de Variación de "Y" (espacial)

A su vez:

$$a = \frac{1}{l_0} \quad (7)$$

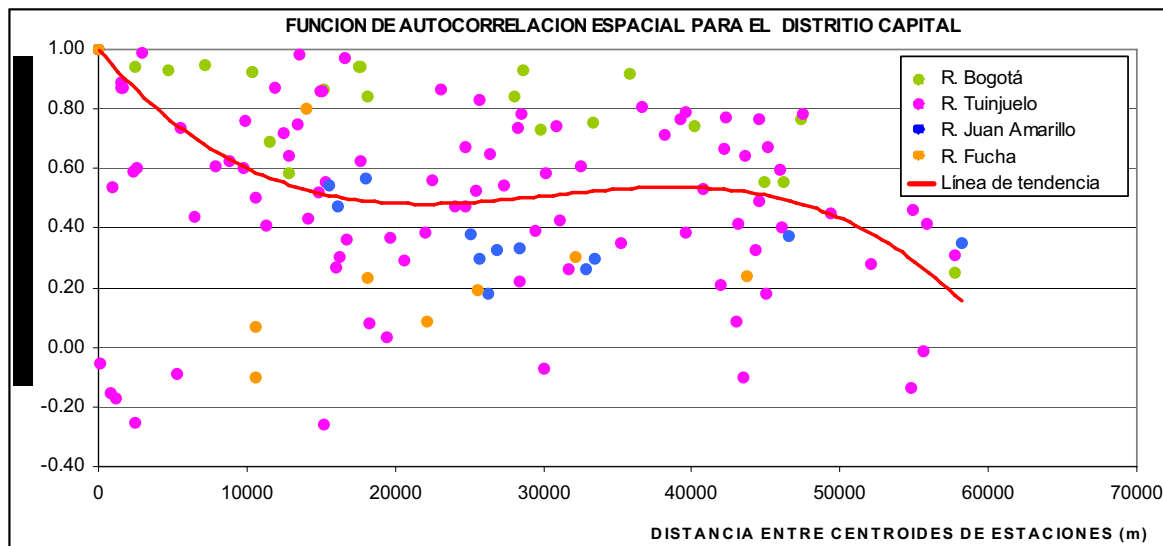


Figura 3. Función de autocorrelación espacial

2.3.1.2.3 Criterio de representatividad

Las estaciones de régimen general se ocupan del seguimiento de variables que dependen sólo del régimen hidroclimático y que no se ven afectados por factores locales; la escorrentía de cuencas pequeñas, por lo regular, presenta anomalías locales debido a la falta de una profundidad de disección que les permita drenar completamente el acuífero subyacente y a otros factores microclimáticos y orográficos.

Para la determinación del área representativa se utiliza la construcción de curvas $Y = f(A)$ en las cuales se relaciona la lámina de escorrentía anual con el área aferente a las estaciones de monitoreo. De acuerdo con esta curva, la escorrentía tiende a un valor constante después de superar un área crítica mínima A'_{\min} y hasta alcanzar un área crítica máxima A'_{\max} . La función $Y = f(A)$ en el dominio $0 < A \leq A'_{\min}$ presenta comportamientos muy diversos asociados a hidrologías locales, mientras que en el dominio $A'_{\max} < A < \infty$ la complejidad de $Y = f(A)$ está asociada a la influencia de factores exógenos a la región donde se registran las mediciones, la escorrentía medida en estas estaciones esta influida por factores climáticos de diversas regiones. La escorrentía registrada en el dominio $A'_{\min} < A \leq A'_{\max}$ es aquella cuyo régimen está definido principalmente por los factores hidroclimáticos conformando un conjunto

estadístico válido para la extrapolación geográfica de la escorrentía, de modo que el área representativa para las estaciones de monitoreo hidrológico de una red de referencia nacional deben estar contenidas en el dominio señalado. El régimen hidrológico Colombiano no presenta un valor crítico para A'_{max} (véase Figura 4), por ello el área representativa se establece por el valor crítico A'_{min} .

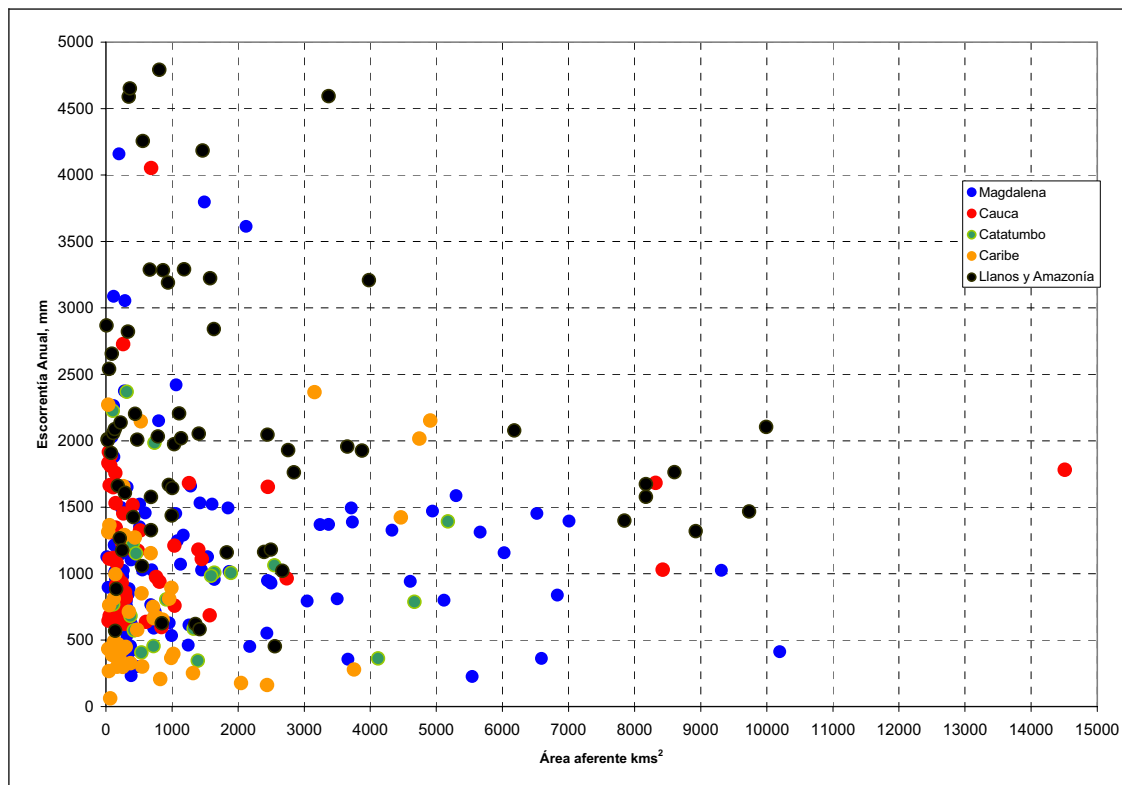


Figura 4. Comportamiento de la función $Y = f(A)$ para el territorio colombiano

Para definir el área representativa, en la Cátedra de Hidrofísica e Hidropronósticos de la Universidad Estatal Hidrometeorológica Rusa, fue modificada la prueba estadística de Student, usualmente aplicada a series de tiempo, para analizar la homogeneidad espacial de un conjunto de datos de escorrentía. Para ello los valores de escorrentía del dominio de interés se ordenan en forma ascendente por el atributo de área aferente, lo que convierte a este conjunto de datos en el análogo de una serie de tiempo en el espacio, de modo que es posible postular la hipótesis sobre la homogeneidad de dos subconjuntos de datos obtenidos del conjunto de datos ordenados como se describió anteriormente. La partición subsiguiente del conjunto de datos, en subconjuntos de potencia desigual, permite detectar, aplicando el criterio de Student, con el nivel de significación requerido, la magnitud de área aferente que genera grupos de escorrentía homogénea obedientes al comportamiento hidrológico de una u otra región.

2.3.1.3 Relación general de los criterios de optimización para estaciones de régimen general

Después de obtener la base criterial para la optimización de la red hidrológica es necesario establecer las reglas para la designación del área óptima, con su correspondiente densidad de estaciones de régimen general.

El área óptima que debe cubrir cada estación de régimen general, en la mayoría de los casos se determina por la siguiente relación:

$$A_{representativa} \leq A_{gradiente} \leq A_{optima} \leq A_{correlativa} \quad (8)$$

De aquí se obtiene que el óptimo número de nodos " N_{nodos} " será igual a:

$$N_{nodos} = \frac{\text{Área de la cuenca}}{A_{optima}} \quad (9)$$

En la práctica también pueden presentarse los siguientes casos:

2.3.1.3.1 Caso 1

$$A_{correlativa} > A_{gradiente} > A_{representativa} \quad (10)$$

$$A_{gradiente} > A_{correlativa} > A_{representativa} \quad (11)$$

$$A_{correlativa} > A_{representativa} > A_{gradiente} \quad (12)$$

$$A_{gradiente} > A_{representativa} > A_{correlativa} \quad (13)$$

En esta situación el área óptima es igual a:

$$A_{optima} = \frac{A_{correlativa} + A_{gradiente}}{2} \quad (14)$$

2.3.1.3.2 Caso 2

$$A_{representativa} > A_{correlativa} > A_{gradiente} \quad (15)$$

$$A_{representativa} > A_{gradiente} > A_{correlativa} \quad (16)$$

En esta situación se debe tomar:

$$A_{optima} = A_{representativa} \quad (17)$$

2.3.1.4 Formulación de criterios para estaciones de régimen específico

Una red integral debe contener estaciones de régimen específico, orientadas a suministrar información de régimen particular de alta resolución. Esto plantea la necesidad de un seguimiento espacial más denso. La particularidad de los objetivos que se persigue alcanzar con una red de referencia específica obliga a diseñar, para cada caso en especial, una estrategia de optimización muy puntual y dependiente de la investigación en curso.

A continuación se presenta un esquema de diseño para redes específicas basado en la teoría de cuenca Hortoniana. Sin querer postular estos criterios como axiomas generales, es muy clara su objetividad en

cuanto al diseño de redes específicas orientadas a obtener información para estudios de balances hídricos de alta resolución.

El esquema propuesto, permite definir el número de afluentes a considerar en los nodos de observación, a partir del número de orden de la cuenca en estudio y tomando en consideración grado de precisión con que se quiere estudiar el proceso. Esto quiere decir que a partir de la configuración espacial de la cuenca y del error sistemático de la tecnología de medición es posible definir una densidad adecuada para que la red hidrológica de soporte a estudios de alta resolución o de administración detallada.

Teniendo en cuenta la configuración espacial de la red hidrográfica a través de la primera ley de Hortón se puede obtener el número de la cuenca que se expresa como:

$$n = 2.2 \text{LOG}(Q_n) + 6.35 \quad (18)$$

Donde n – Número de orden de la cuenca
 Q_n – Caudal promedio de la cuenca

Dado que es imposible ubicar estaciones en todos los afluentes de un río es necesario limitar las estaciones a aquellas corrientes que aportan al cauce principal de la cuenca un determinado porcentaje de su caudal. Usualmente ese porcentaje debe ser mayor que el porcentaje de error sistemático de la tecnología de aforo. Para este efecto es necesario combinar la primera ley de Hortón con su segunda ley que se define por la expresión:

$$S_k = r_b^{n-k-1} (r_b - 1) \quad (19)$$

Donde S_k es el número de afluentes de orden "k" que aportan un flujo al cauce principal mayor que el error de medición del caudal (σ) y r_b es la relación de bifurcación

Si observamos el número total de puestos de medición en la red como compuesto por estaciones de régimen general y de régimen específico entonces tendremos que el número total de estaciones " N_T " debe ser igual a:

$$N_T = N_{RG} + N_{RE} + N_P, \quad N_P \approx (N_{RG} + N_{RE})(1 + \alpha) \quad (20)$$

Donde N_T – Número total de estaciones
 N_{RG} – Número óptimo de estaciones de régimen general
 N_{RE} – Número de estaciones de régimen específico
 N_P – Número de estaciones en pequeñas corrientes de interés prioritario
 α – Porcentaje de estaciones en pequeñas corrientes de interés prioritario. ($\alpha = 0.15-0.30$).

2.3.2 Criterios para la selección del punto de observación

La decisión final sobre cual punto físico escoger para la instalación de estaciones hidrológicas debe tomarse teniendo en cuenta:

- Las especificaciones del programa de medición y sus objetivos;

- La metodología de reconstrucción de hidrogramas anuales a partir de curvas de gasto $H = f(Q)$;
- Las condiciones de accesibilidad, seguridad y disponibilidad de observadores de campo;
- El acceso a medios de comunicación;

El primer ítem es intuitivo, el puesto de la estación debe ser adecuado para el programa de mediciones escogido y para cumplir los objetivos planteados por la organización que instala la estación. Los factores siguientes son obvia consecuencia del primero. El cumplimiento del segundo es de alta prioridad ya que de este depende que los hidrogramas anuales, construidos con base en la información de la estación sean lo suficientemente exactos para cumplir los objetivos de este punto de medición y su programa.

Para darle cumplimiento al segundo ítem es necesario que el punto de medición cumpla con las siguientes especificaciones:

- El régimen de niveles del punto de medición debe ser característico para el tramo en que se ubicará la estación;
- El tramo de río, donde se ubicará la estación, debe ser recto. La longitud del tramo debe ser equivalente a cinco veces el ancho de la sección en periodo de estiaje. El ancho de la sección, y en lo posible su forma, deben ser uniformes a lo largo del trayecto seleccionado;
- El tramo y la sección donde se ubicara la estación deben ser estables;
- En lo posible la sección debe ser de forma regular, sin planicie de inundación (o que el flujo de la corriente no escape del lecho principal) y estar libre de vegetación acuática;
- El punto de medición no puede estar afectado por fenómenos de remanso;
- En el trayecto donde se ubicará la estación no deben existir bocatomas ni vertimientos (a menos que el objetivo de la estación sea controlar a la magnitud de los mismos);
- En zonas montañosas es necesario, además, que la estación se ubique en el sector con menor turbulencia y donde no exista la presencia o transporte de rocas o fragmentos de rocas grandes.
- Si aguas abajo del tramo seleccionado para la instalación de una estación existe una obra hidráulica o circunstancias naturales que generen remanso es necesario verificar que la ubicación del punto de medición se encuentre fuera del radio de influencia del remanso.

Si se incumple con alguna o algunas de estas condiciones, es necesario tener en cuenta cual, ó cuales y tomarlas en consideración al elegir los métodos de construcción de las curvas $H = f(Q)$ y de su respectiva metodología de generación de caudales.

La selección del punto de medición debe estar documentada con los criterios que se tomen en consideración para su elección así como con los materiales de la prospección de campo para la selección del punto más adecuado. Entre los materiales de campo se debe contar con:

- Planos topográficos del tramo de corriente seleccionado y de su respectivo entorno;
- Georeferenciación del punto de instalación con coordenadas X, Y, Z dentro del Sistema Geodésico Nacional;
- Batimetría del tramo seleccionado y perfiles (nivelados con alta precisión) de sus secciones características;
- Fotografías de las secciones características del tramo.

Los dos últimos factores garantizan la continuidad del registro y de las acciones de operación y mantenimiento de la nueva estación. En caso de que estos no se cumplan, pero aún así la estación sea necesaria, se debe buscar alternativas como la instalación de estaciones automáticas con sistema de almacenamiento de datos y/o transmisión de los mismos por canales de comunicación no convencionales (vía satélite, Telemetría terrestre (VHF), Transmisión radial por reflexión en la ionosfera, radio, etc.) a la central de acopio de datos más cercana.

2.4 Diseño de ampliación de la red hidrológica con fines de pronóstico de niveles para emisión de alertas por inundación

2.4.1 Red Actual

La red de estaciones hidrológicas del Distrito Capital es operada por varios entes (CAR, FOPAE, EAAB, DAMA entre los que se conocen), tal como se aprecia en la Figura 5. Esta condición ha llevado a la implementación de redes hidrológicas con diferentes propósitos y a que en un mismo punto de monitoreo existan dos o más estaciones que miden la misma variable.

Los objetivos más relevantes de las redes hidrométricas del Distrito Capital son:

- Monitorear las variables de calidad del agua en la red hídrica del Distrito, especialmente en los puntos de descargas más importantes de aguas residuales.
- Emisión de alertas tempranas por inundación.
- Pronóstico de niveles del agua.
- Monitorear la disponibilidad del recurso hídrico.
- Monitorear el nivel del agua en embalses y obras para el control y/o mitigación de inundaciones.

De acuerdo al propósito por el cual se instalaron cada una de las diferentes estaciones hidrométricas se cuenta con diversidad en la tecnología y la frecuencia de medición de las variables hidrológicas. Entre los tipos de estaciones hidrométricas se encuentran:

- Limnimétrica
- Limnigráfica
- Automática
- Telemétrica
- De Aforos líquidos y sólidos
- De Calidad del agua.

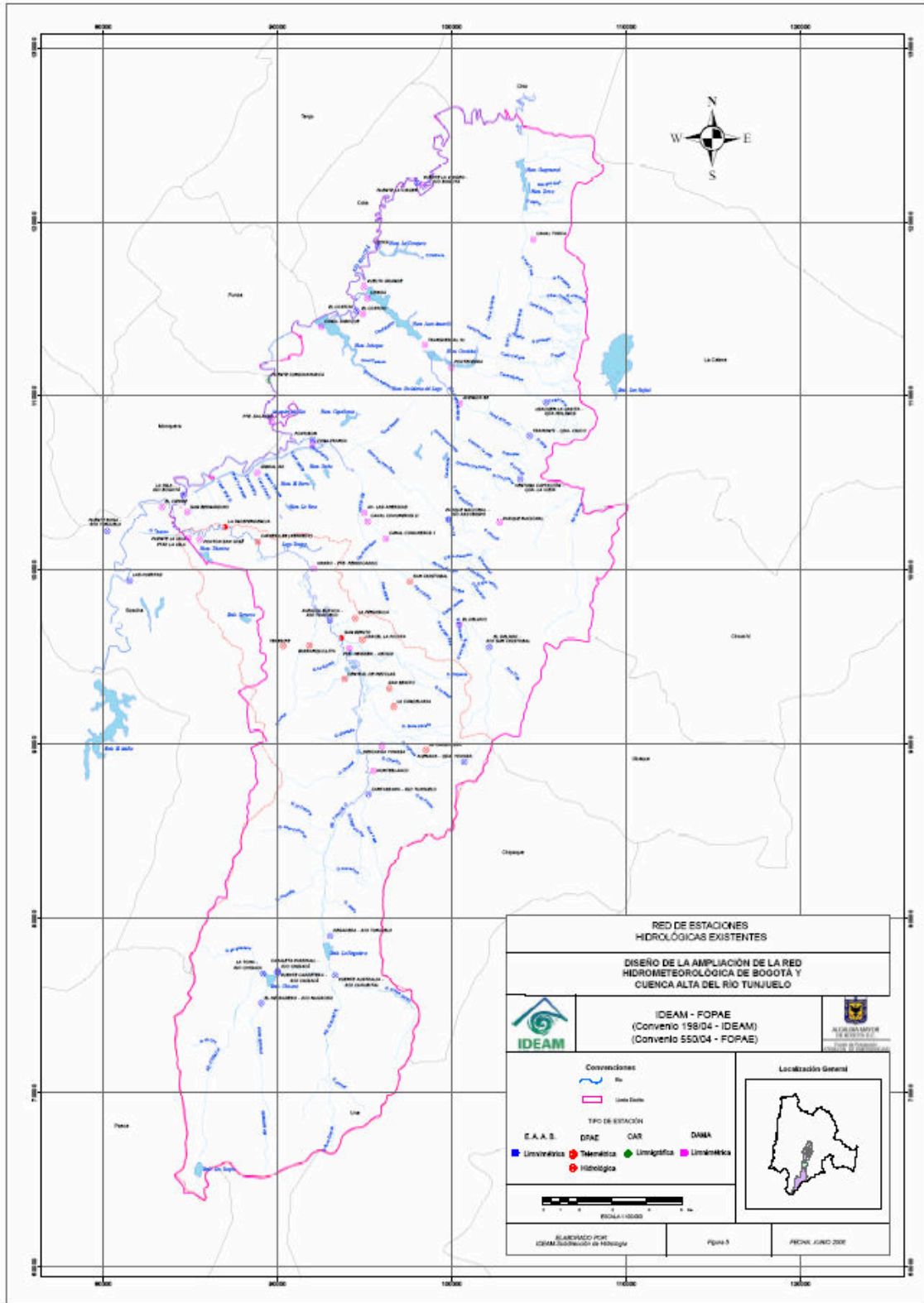


Figura 5. Red hidrológica existente

Por otra parte, la red hídrica del Distrito Capital esta conformada en gran parte por ríos de régimen torrencial y una serie de embalses, humedales y estructuras hidráulicas que hacen que el flujo sea controlado. Esto sumado a la extensa área urbana y a los problemas de inundación, han obligado que en la actualidad se cuente con una red hidrológica aparentemente distribuida en forma poco uniforme a lo largo del Distrito Capital.

2.4.2 Evaluación de los criterios para la red de referencia general

2.4.2.1 *Análisis previos*

2.4.2.1.1 Escorrentía

El objetivo primordial de la red hidrológica a optimizar es monitorear a lo largo de las corrientes principales el paso de las crecientes originadas por caudales máximos asociados a eventos significativos de inundación. De modo que sea una herramienta útil para: la emisión de alertas tempranas por inundación, el pronóstico de niveles de agua y reproducir posteriormente eventos de inundación mediante modelos matemáticos.

Por lo anterior, los criterios de gradiente, correlativo y área representativa (que se describen en detalle en el numeral 2.3.1) han de evaluar el régimen hidrológico más representativo durante un evento característico de inundación; que en términos generales puede ser definido mediante el campo de escorrentía.

Por ello fue necesario establecer un campo de escorrentía que caracterizara los eventos de inundación que ocurren en el Distrito Capital, para lo cual se analizaron tres escenarios diferentes que podrían representar de manera general los eventos significativos de inundación:

- Escorrentía Media Anual:
Calculada a partir de los valores diarios de caudal y las áreas de drenaje. Con base en esta información y en la estimación de los centros ideales de las áreas de drenaje se elaboró un mapa de escorrentía mediante las herramientas de interpolación del módulo de Spatial Analyst de ArcGIS 9.1. Como resultado se obtuvo el mapa que se indica en la Figura 6.

En la Figura 6 se aprecia que los sectores que registran láminas de escorrentía mayor a los 600 mm/año durante un año promedio están localizados en la parte alta (río Curubital) y media (quebradas de Yomasa, Santa Librada y Fucha) del río Tunjuelo y en la parte alta del río Fucha (río San Cristóbal).

Contrarrestando el superávit de escorrentía en la parte alta del río San Cristóbal, aledaño en la parte alta de las cuencas de los ríos San Agustín y San Francisco, se registran escorrentías inferiores a 400 mm/año, mostrando una alta heterogeneidad de la escorrentía en la cuenca del río Fucha.

Por otra parte, las cuencas del río Juan Amarillo y el humedal Guaymaral presentan una distribución espacial homogénea de la escorrentía, al igual que la vertiente occidental de la cuenca del río Tunjuelo con láminas de escorrentía que oscilan entre 300 a 600 mm/año.

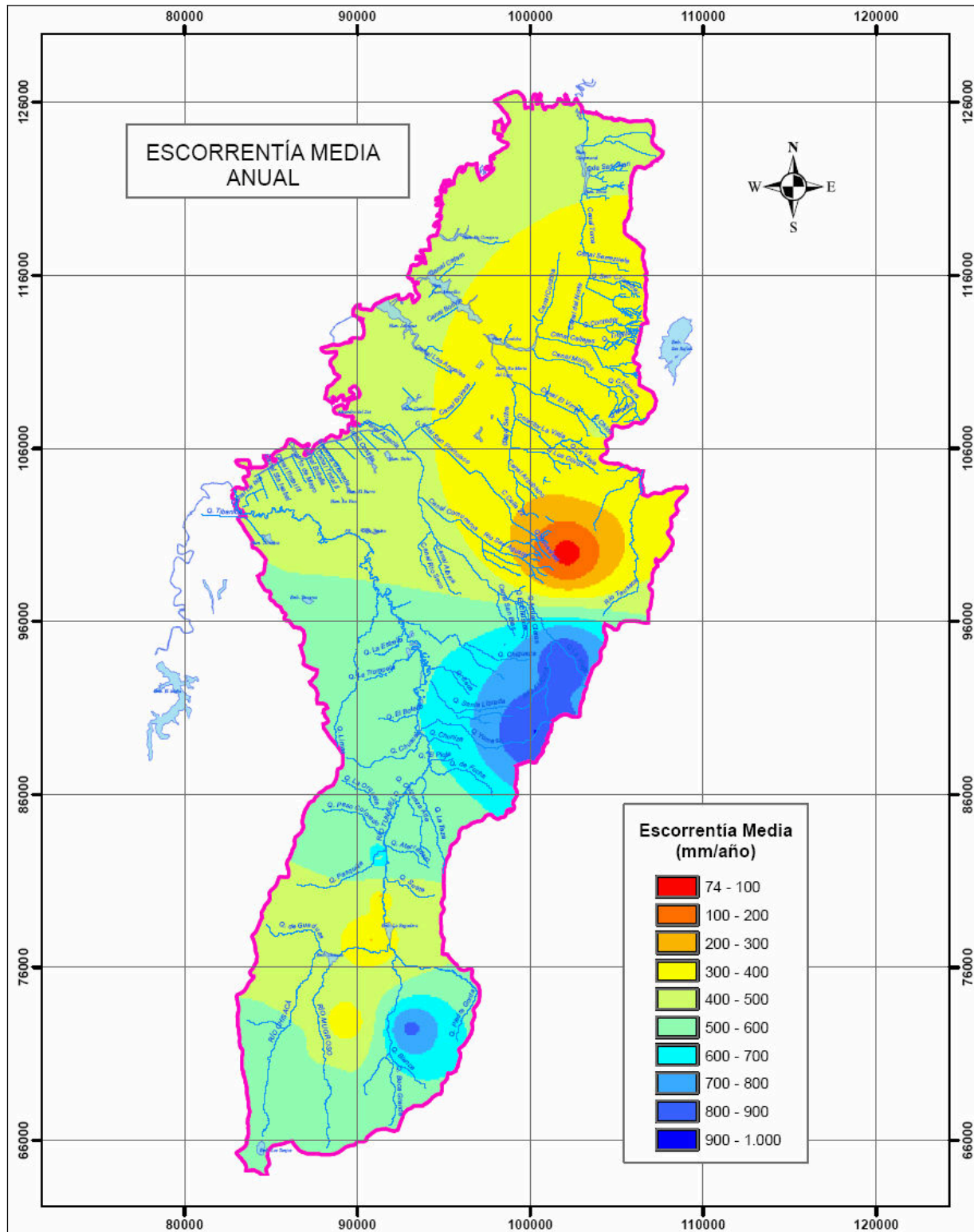


Figura 6. Mapa de escorrentía media anual

- Escorrentía Máxima:

Al evaluar esta alternativa se encontró que los valores extremos (máximos) no necesariamente representan un comportamiento hidráulico coherente de un evento típico de inundación. Esto se debe a que un caudal máximo registrado en un punto de monitoreo no necesariamente es mayor al registrado en otra estación aguas arriba, lo cual está asociado a que la red hídrica de Bogotá cuenta con una serie de embalses y humedales que retienen parte del flujo.

Otras causas son: series históricas sin un mismo período de registro o con vacíos importantes, no emplear una misma metodología para la toma de información por las entidades que operan estaciones hidrológicas, curvas de gasto con poca información, entre otras.

Considerando lo anterior, se analizaron los valores de caudales registrados en un día en que se halla presentado inundaciones por desbordamiento. De lo cual se pudo concluir que cada evento de inundación en el Distrito Capital se origina por condiciones hidroclimáticas (ej. Distribución e intensidad de la precipitación) y antropológicas particulares (ej. Obstrucciones en los canales, operación de los embalses), por tal razón no es viable generalizar a partir de uno de estos eventos puntuales.

- Escorrentía igualada o excedida el 5% y el 2% del tiempo:

Considerando los limitantes encontrados en la alternativa de la escorrentía máxima, se planteó establecer un rango de caudales que hallan originado eventos de inundación. Para tal fin, se graficó la curva de duración de caudales (Ver Mapa 1) donde se pudo deducir que cuando se supera o iguala los caudales con un tiempos de excedencia del 5% ocurren habitualmente eventos de inundación.

De acuerdo a lo anterior, se graficaron los curvas de duración para los valores diarios de escorrentía (Ver Mapa 2) y se estimaron los valores de escorrentía para tiempos de excedencia del 2% y 5%. Los valores estimados de escorrentía media (Y_{MED}), de tiempos de excedencia del 2% ($Y_{TE2\%}$) y 5% ($Y_{TE5\%}$) se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de escorrentía media y de tiempo de excedencia del 2% y 5%

Estación No.	Código	Nombre	Y_{MED} (mm/día)	$Y_{TE2\%}$ (mm/día)	$Y_{TE5\%}$ (mm/día)
1	2120889	CHICÚ	0.40	1.44	1.01
2	2120888	EL CORTIJO	0.63	1.65	1.21
3	2120811	PUENTE LA VIRGEN - RÍO BOGOTÁ	0.32	0.81	0.69
4	2120810	VUELTA GRANDE - RÍO BOGOTÁ	0.30	0.83	0.68
5	2120806	LAS HUERTAS	0.72	1.47	1.26
6	2120802	LA ISLA - RÍO BOGOTÁ	0.55	1.14	0.94
7	2120714	PUENTE CUNDINAMARCA	0.55	1.35	1.11
8	2120954	PUENTE CARRETERA - RÍO CHISACÁ	1.38	5.81	3.93
9	2120895	LA FISCALA	0.75	1.45	1.33
10	2120836	AVENIDA BOYACÁ - RÍO TUNJUELO	1.41	4.47	3.49
11	2120759	CANALETA PARSHALL - RÍO CHISACÁ	0.43	1.80	1.23
12	2120750	CANTARRANA - RÍO TUNJUELO	1.15	5.71	4.15
13	2120747	EL HERRADERO - RÍO MUGROSO	1.40	7.66	5.44
14	2120746	LA TOMA- RÍO CHISACÁ	1.54	9.54	5.75
15	2120725	PUENTE AUSTRALIA - RÍO CURUBITAL	2.24	11.33	8.78
17	2120706	REGADERA - RÍO TUNJUELO	0.92	4.88	4.49
18	2120701	PUENTE BOSA - RÍO TUNJUELO	1.40	4.41	3.52
19		INDEPENDENCIA	1.79	5.91	4.59
20		KENNEDY	1.83	3.72	3.25

Tabla 4. Valores de escorrentía media y de tiempo de excedencia del 2% y 5%

Estación No.	Código	Nombre	Y_{MED} (mm/día)	$Y_{TE2\%}$ (mm/día)	$Y_{TE5\%}$ (mm/día)
21		SAN BENITO	0.74	2.44	1.90
22	2120945	ALEMANA - QDA. YOMASA	2.47	8.71	7.14
23	2120949	VENTANA - CAPTACIÓN - QDA. LA VIEJA	0.85	3.42	2.35
24	2120948	TRAMONTI - QDA. CHICO	1.13	6.72	3.50
25	2120942	USAQUÉN-GARITA-QDA. MOLINOS	0.93	3.48	2.16
26	2120951	PARQUE NACIONAL - RÍO ARZOBISPO	0.20	0.92	0.64
28	2120705	EL DELIRIO - RÍO SAN CRISTÓBAL	2.35	10.83	6.93

Adicional a esto y con el fin de atenuar en mayor grado las limitantes observadas en los valores extremos, se calculó $Y_{TE2\%}$ y $Y_{TE5\%}$ a partir de los valores de Y_{MED} , para lo cual se estimaron las regresiones de tipo polinómica con valores de los coeficientes de determinación superiores al 79%. Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 7.

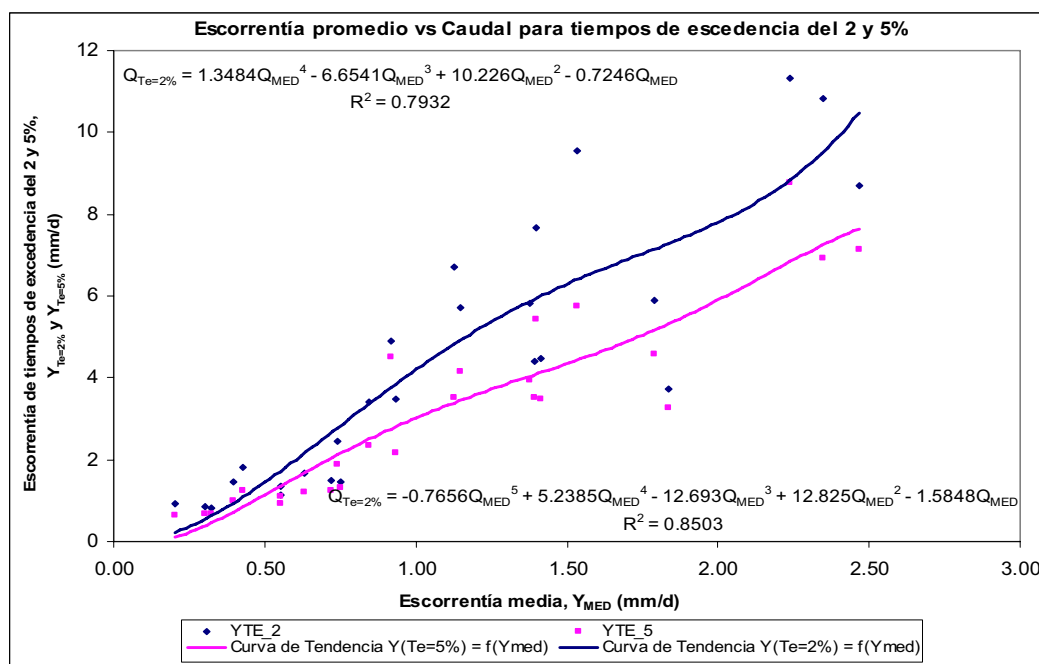


Figura 7. Regresiones para el cálculo de $Y_{TE2\%}$ y $Y_{TE5\%}$

El cálculo del campo de escorrentía para tiempos de excedencia del 2% y 5% consistió en aplicar las regresiones antes calculadas al campo de escorrentía media diaria, para ello se empleó la herramienta Raster Calculator del módulo de Spatial Analyst de ArcGIS 9.1. Finalmente, a partir de los campos de escorrentía diaria se calculan los de escorrentía anual, tal como lo demanda la metodología de Karasiov. Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 8 y Figura 9.

Como es de esperarse, la distribución espacial de la escorrentía $Y_{TE2\%}$ y $Y_{TE5\%}$ que se aprecia en la Figura 8 y la Figura 9 son similares a la observada en el mapa de escorrentía media (ver Figura 6). Lo que cambia básicamente es la proporción de la lámina de escorrentía; de tal modo que para $Y_{TE2\%}$ los valores oscilan entre 80 y 3820 mm/año y para $Y_{TE5\%}$ entre 40 y 2790 mm/año.

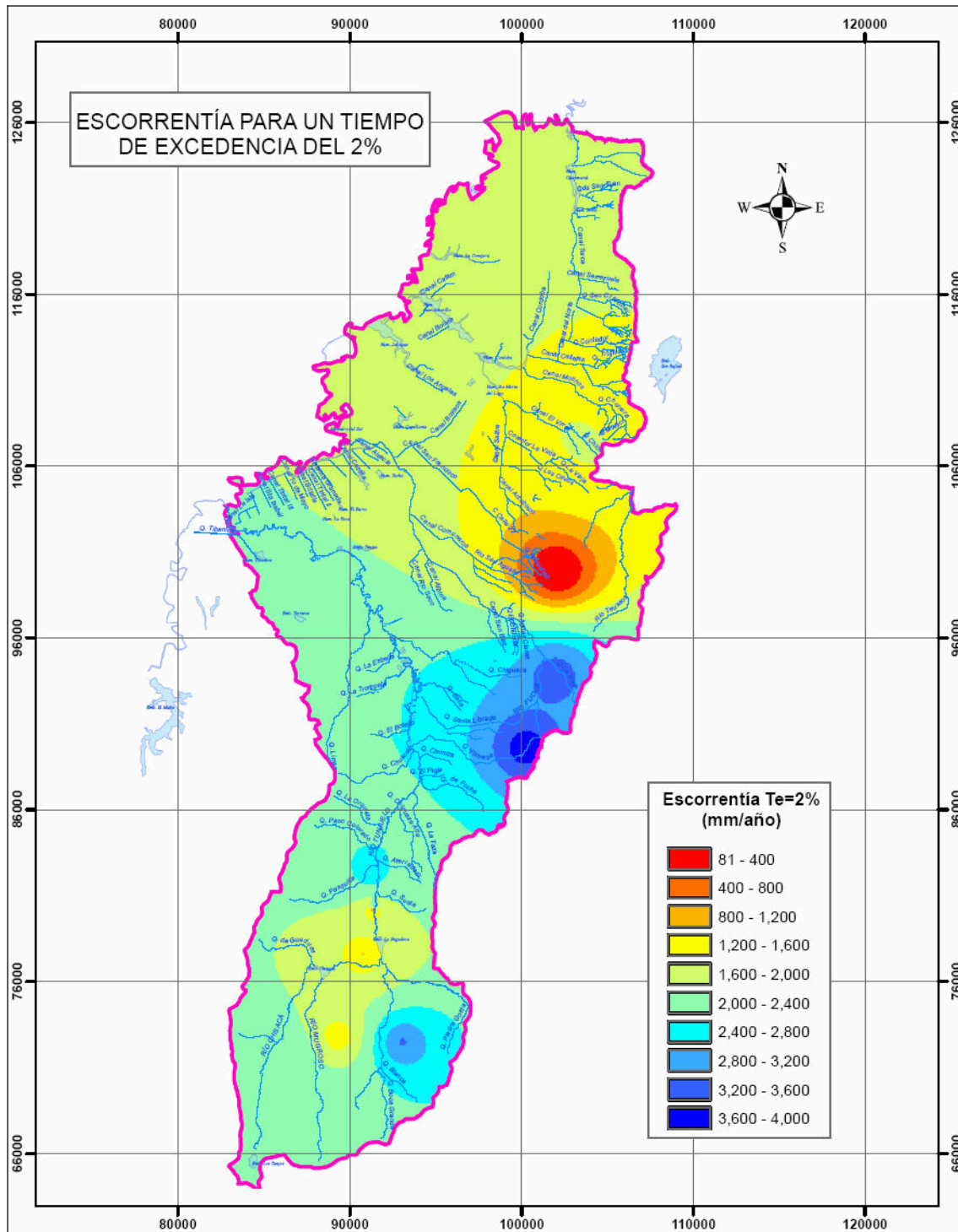


Figura 8 Escorrentía para un tiempo de excedencia del 2%

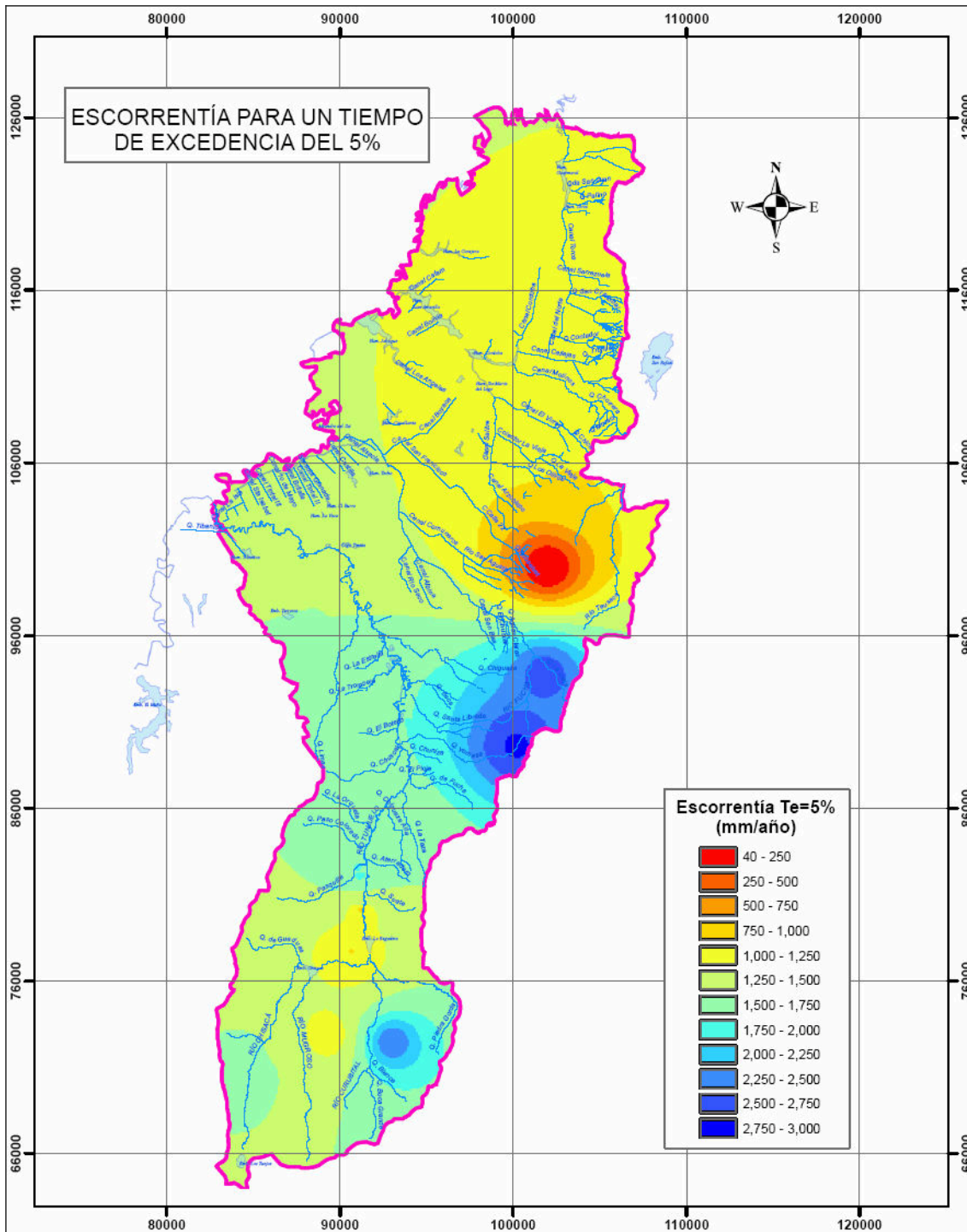


Figura 9. Escorrentía para un tiempo de excedencia del 5%

2.4.2.1.2 Gradiente

A partir de los campos de escorrentía (ver Figura 6, Figura 8 y Figura 9) se calcularon los gradientes con el apoyo de la herramienta Slope del módulo de Spatial Analyst de ArcGIS 9.1. Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 10 a la Figura 12.

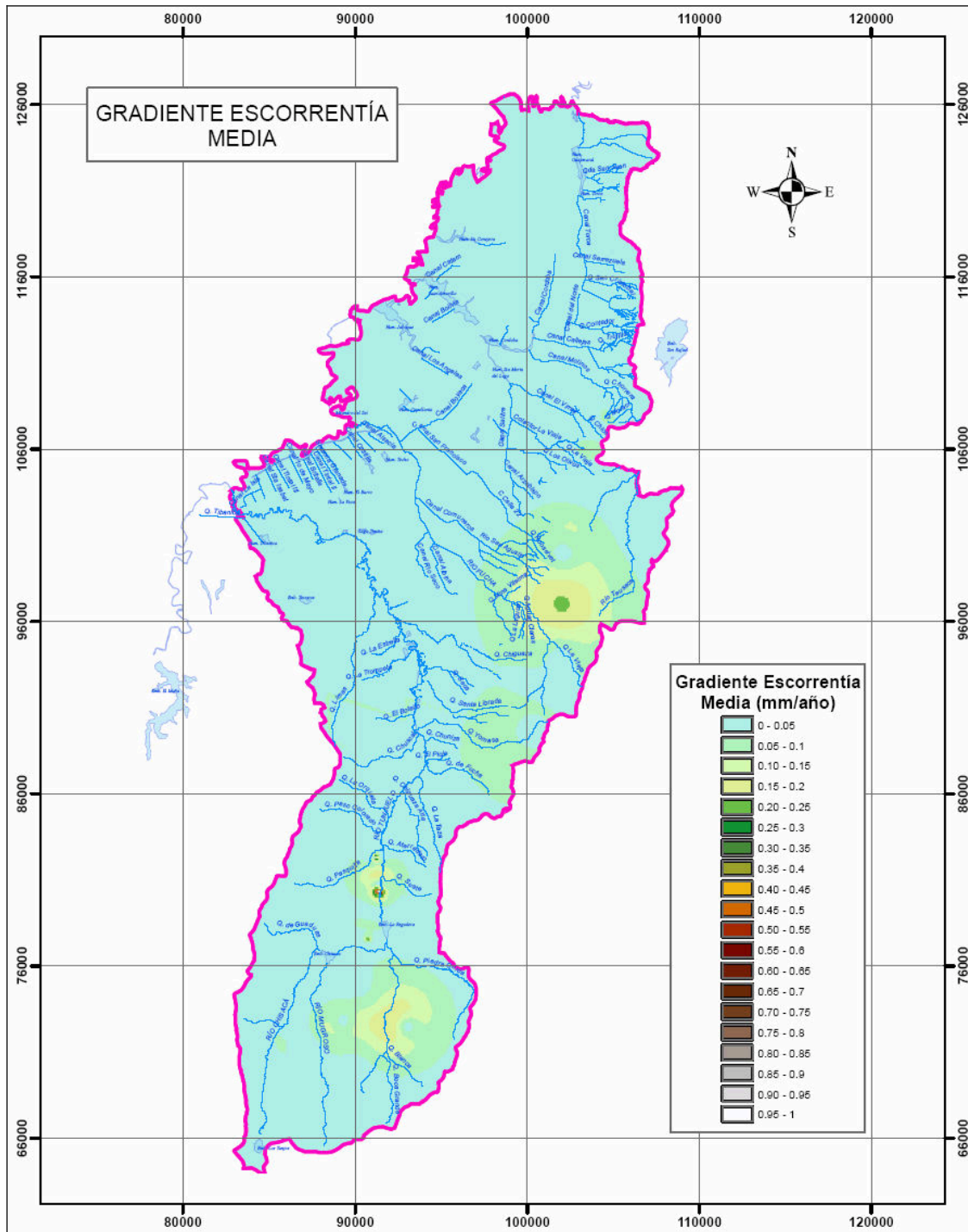


Figura 10. Mapa del gradiente de YMED

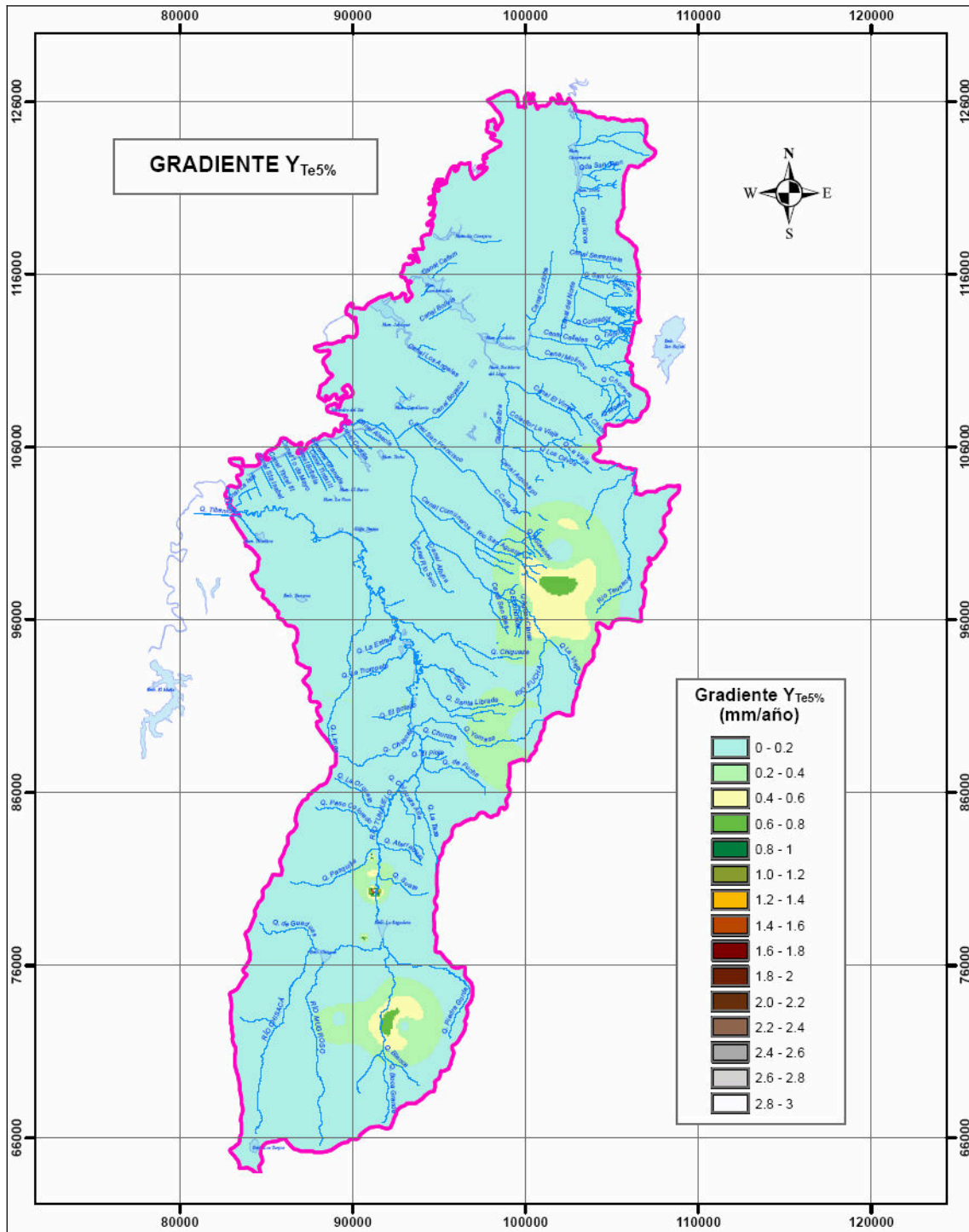


Figura 11. Mapa del gradiente de $Y_{Te5\%}$

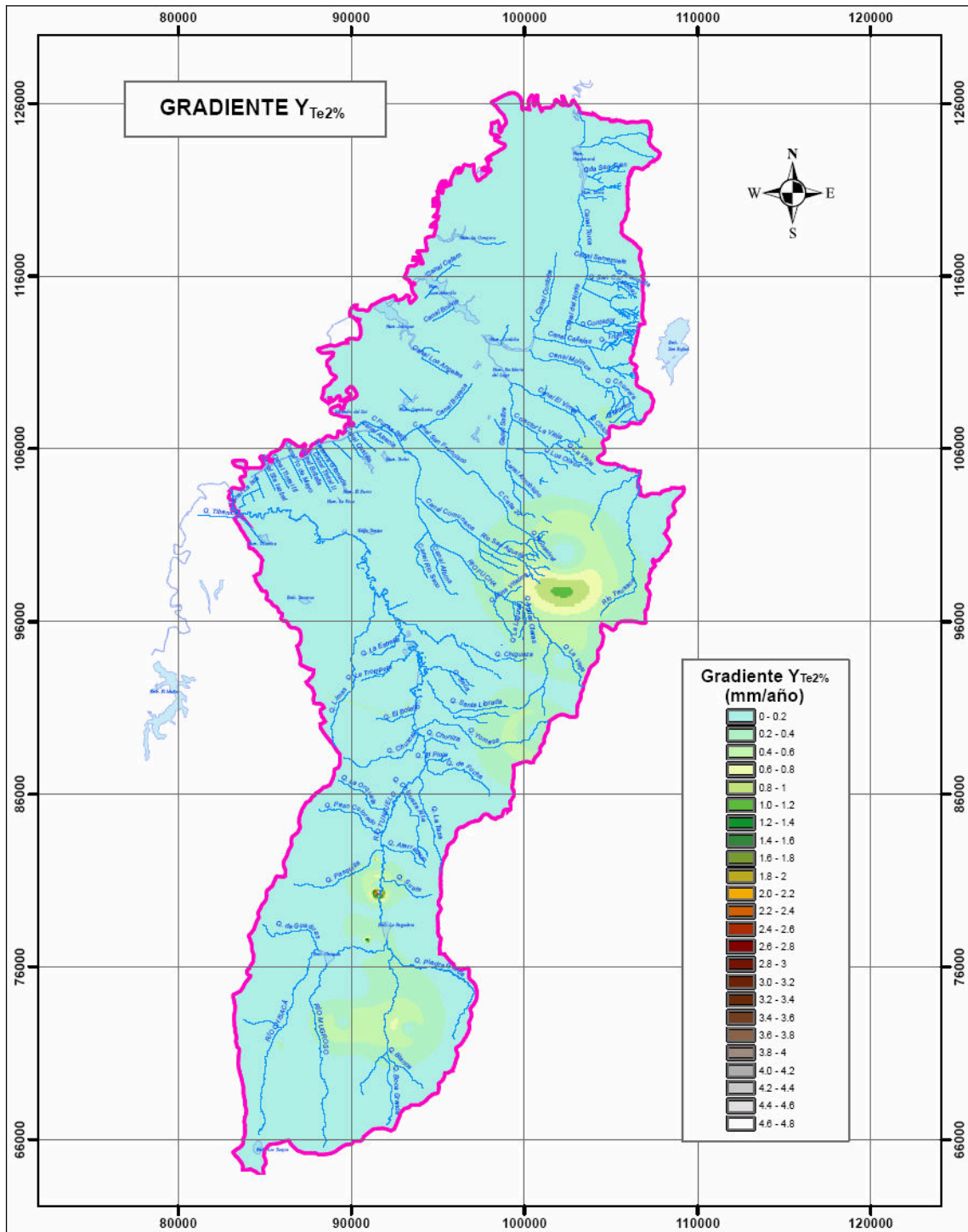


Figura 12 Mapa del gradiente de $Y_{Te2\%}$

La distribución espacial de gradiente de escorrentía para los diferentes casos evaluados muestra que predomina el rango más bajo de gradiente, indicando una baja variabilidad y distribución homogénea del gradiente de escorrentía en el espacio.

Por otra parte, los mayores gradientes se presentan en los sectores donde se registraron valores máximos y mínimos de escorrentía.

2.4.2.1.3 Zonificación

El área de estudio ha mostrado una gran diversidad de condiciones a nivel hidroclimático y del uso del suelo, impidiendo hacer un análisis conjunto de la optimización de la red. Por tal motivo, se ha zonificado el área de estudio en tres zonas relativamente homogéneas (ver Figura 13 y Tabla 5), considerando que la semejanza de las características de hidrológicas y físicas son propios de cada cuenca hidrográfica, de tal modo que la zonificación reúne cuencas con características similares, como:

- Configuración del relieve (Zonas montañosas y planas)
- Proporción de zonas urbanas y rurales
- Distribución espacial de la escorrentía
- Zonas de bajo y alto gradiente de escorrentía
- Régimen de caudales predominante
- Sectores que han presentado eventos de inundación

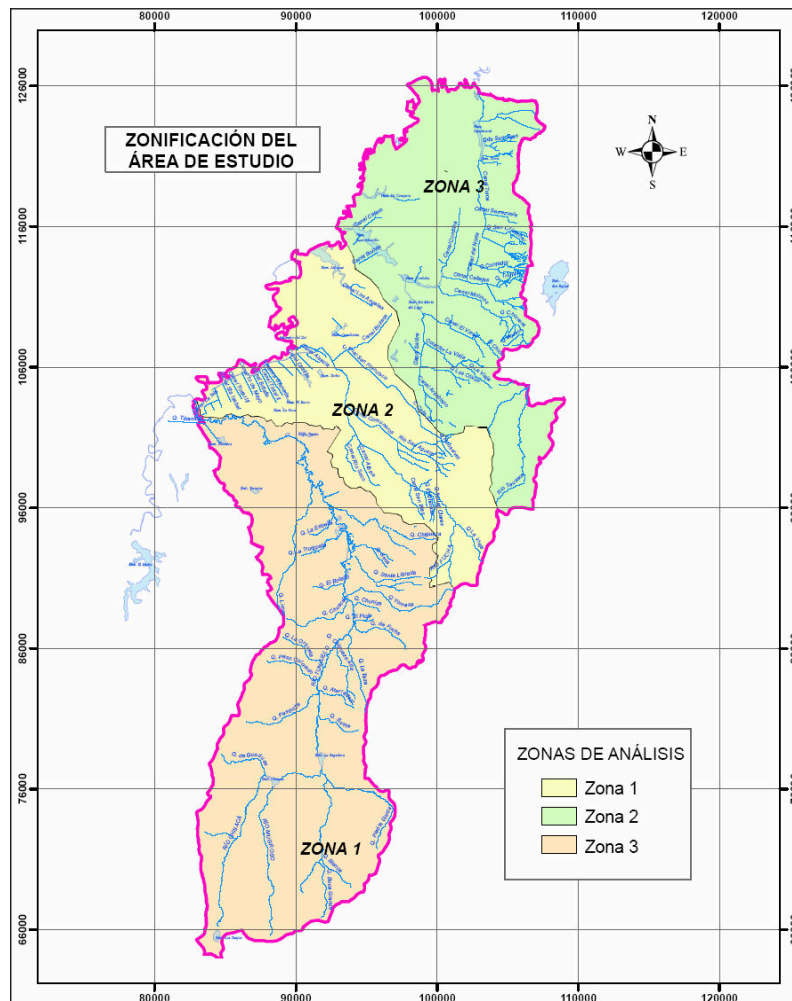


Figura 13. Zonificación del área de estudio

Tabla 5. Zonificación del área de estudio

Zona de Análisis	Cuenca	Área Zona (Km ²)
Zona 01	RÍO TUNJUELO	400
Zona 02	RÍO FUCHA	200
Zona 03	RÍO JUAN AMARILLO – H. GUAYMARAL	266

Basados en la zonificación establecida se calcularon los valores promedio, máximos, mínimos, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (Cv) de cada una de las zonas, tanto para la escorrentía como para su gradiente. Para ello se utilizó la herramienta Zonal Statistics del módulo Spatial Analyst de ArcGIS 9.1. Los resultados que se obtuvieron se pueden apreciar en la Tabla 6 a la Tabla 8.

Tabla 6. Estadísticas del campo de escorrentía y gradiente medio por zonas

ZONAS	Escorrentía media (Y_{MED})					Gradiente de Y_{MED}				
	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv
Zona 01	276	900	542	90	0.17	0.000	0.972	0.0296	0.032	1.08
Zona 02	74	876	449	146	0.32	0.001	0.205	0.0361	0.044	1.23
Zona 03	162	603	379	40	0.11	0.000	0.150	0.0127	0.020	1.60

Tabla 7. Estadísticas del campo de escorrentía y gradiente $T_e=5\%$ por zonas

ZONAS	Escorrentía para $T_e=5\%$ ($Y_{Te=5\%}$)					Gradiente $Y_{Te=5\%}$				
	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv
Zona 01	792	2790	1586	267	0.17	0.000	2.874	0.0861	0.102	1.18
Zona 02	40	2717	1334	462	0.35	0.002	0.691	0.1161	0.150	1.29
Zona 03	328	1735	1138	130	0.11	0.000	0.475	0.0415	0.070	1.68

Tabla 8. Estadísticas del campo de escorrentía y gradiente $T_e=2\%$ por zonas

ZONAS	Escorrentía para $T_e=2\%$ ($Y_{Te=2\%}$)					Gradiente $Y_{Te=2\%}$				
	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	s (mm/año)	Cv
Zona 01	1045	3824	2260	320	0.14	0.000	4.648	0.1097	0.128	1.17
Zona 02	81	3619	1867	601	0.32	0.003	1.048	0.1612	0.198	1.23
Zona 03	423	2466	1595	206	0.13	0.000	0.716	0.0649	0.104	1.59

En la Tabla 6 a la Tabla 8 se aprecia que de acuerdo a los valores medios de escorrentía la zona 1, correspondiente a la cuenca del río Tunjuelo, es la que tiene mayor oferta hídrica, siendo en promedio el 40% del total de los aportes de todas las cuencas del Distrito Capital. En segundo lugar esta el río Fucha con el 33% y en último lugar esta la zona 3, que comprende el norte del Distrito Capital, con un 27%. Esto permite concluir que la escorrentía promedio tiende a disminuir a medida que se avanza hacia el norte del Distrito, o bien, cuando nos adentramos en la región andina.

Por otra parte, los valores de gradiente indican que hay cambios prominentes de la escorrentía en cortas distancias sobre la cuenca del río Fucha (Zona 2) con respecto a los observados en el resto del área de estudio. Esto se evidencia en el mapa de escorrentía (ver Figura 6) donde se observan que la cuenca tiene un amplio rango de variación de la escorrentía en áreas muy pequeñas.

En segundo lugar encontramos la cuenca del río Tunjuelo (Zona 1) cuya magnitud del gradiente esta dado por la presencia de estructuras hidráulicas (embalses) que afectan el régimen natural del río y por las condiciones climáticas propias de la zona que acentúan las mayores precipitaciones en ciertos sectores.

En último lugar encontramos la zona 3, la cual además de presentar los más bajos valores de escorrentía no presenta cambios drásticos, haciéndola la zona más homogénea.

2.4.2.1.4 Coeficiente de variación (Cv)

El análisis del coeficiente de variación para la metodología de optimización empleada, requiere el uso de las series históricas con resolución anual de la variable a analizar, que para el caso es la escorrentía. Teniendo en cuenta esto, se tomaron los valores diarios de escorrentía antes calculados y se estimaron los valores medios (Y_{med}) y máximos (Y_{max}) para cada año de registro; para luego calcularle a cada serie histórica obtenida: el promedio (medio), la desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (Cv). Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 9.

Tabla 9. Estadísticas de los valores de escorrentía promedio y máxima multianual

Número Estación	Escorrentía promedio (Y_{med})			Escorrentía máxima (Y_{max})		
	Medio (mm/día)	s (mm/día)	Cv	Medio (mm/día)	S (mm/día)	Cv
1	0.40	0.15	0.38	1.41	0.43	0.31
2	0.63	0.20	0.32	1.57	0.36	0.23
3	0.32	0.09	0.27	0.92	0.23	0.24
4	0.30	0.08	0.25	0.95	0.34	0.36
5	0.72	0.11	0.15	1.91	0.38	0.20
6	0.55	0.08	0.15	1.36	0.42	0.31
7	0.55	0.12	0.21	1.59	0.44	0.27
8	1.38	0.36	0.26	13.92	9.07	0.65
9	0.75	0.02	0.02	1.45	0.46	0.31
10	1.41	0.37	0.26	6.18	3.48	0.56
11	0.43	0.26	0.62	2.08	1.29	0.62
12	1.15	0.18	0.15	4.96	2.28	0.46
13	1.40	0.38	0.27	14.91	7.45	0.50
14	1.54	0.55	0.36	16.40	12.05	0.73
15	2.24	0.46	0.21	16.97	4.76	0.28
17	0.92	0.36	0.40	13.19	10.98	0.83
18	1.40	0.25	0.18	6.99	2.76	0.39
19	1.79	0.31	0.17	10.05	2.85	0.28
20	1.83	0.20	0.11	5.01	1.40	0.28
21	0.74	0.19	0.25	4.03	2.12	0.53
22	2.47	1.07	0.43	13.16	13.78	1.05
23	0.85	0.39	0.46	4.80	2.61	0.54
24	1.13	0.52	0.46	11.05	4.39	0.40
25	0.93	0.95	1.02	3.51	2.76	0.79
26	0.20	0.08	0.39	2.12	2.67	1.26
28	2.35	0.49	0.21	27.64	18.94	0.69

Los valores obtenidos describen la variabilidad de las series históricas en un punto de monitoreo específico, mientras que los análisis realizados hasta el momento son de tipo espacial, cubriendo la totalidad del área de estudio, dando como resultado campos para diferentes variable (ej. escorrentía). Por este motivo, a partir de los valores de coeficiente de variación se calculó el campo para esta variable utilizando las herramientas de interpolación ya mencionadas. Los resultados obtenidos tanto para los valores medios de escorrentía como para los máximos se aprecian en la Figura 14 y la Figura 15, respectivamente.

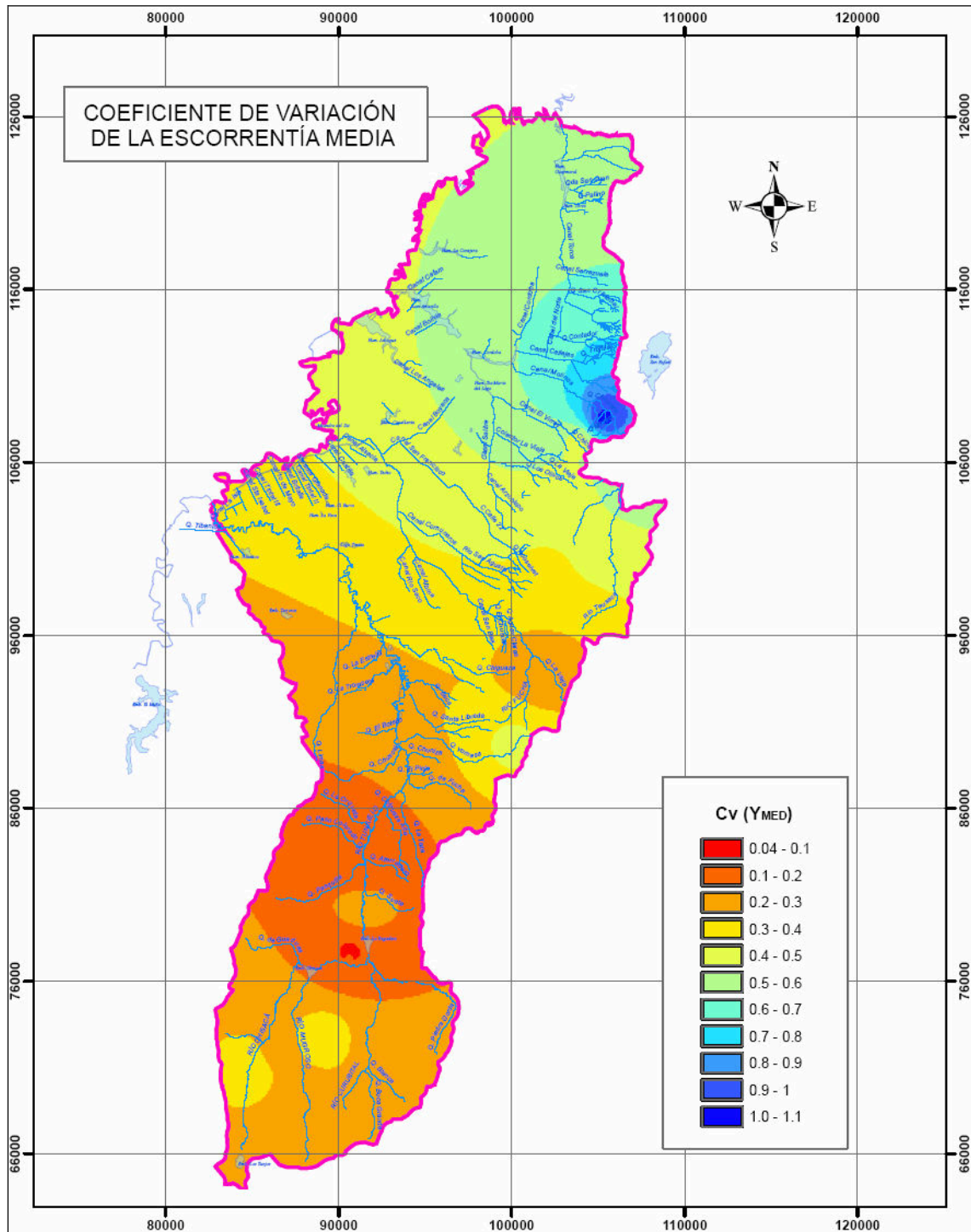


Figura 14. Coeficiente de variación de la escorrentía media

En la Figura 14 y la Figura 15 se aprecia que para el área de estudio el coeficiente de variación oscila entre 0.04 y 1.1 para el caso de escorrentía promedio, mientras que para el de escorrentía máxima el coeficiente de variación fluctúa entre 0.28 a 1.3. Esto permite deducir que los valores máximos de escorrentía o caudal, presentan mayor dispersión a lo largo del tiempo que los valores promedios.

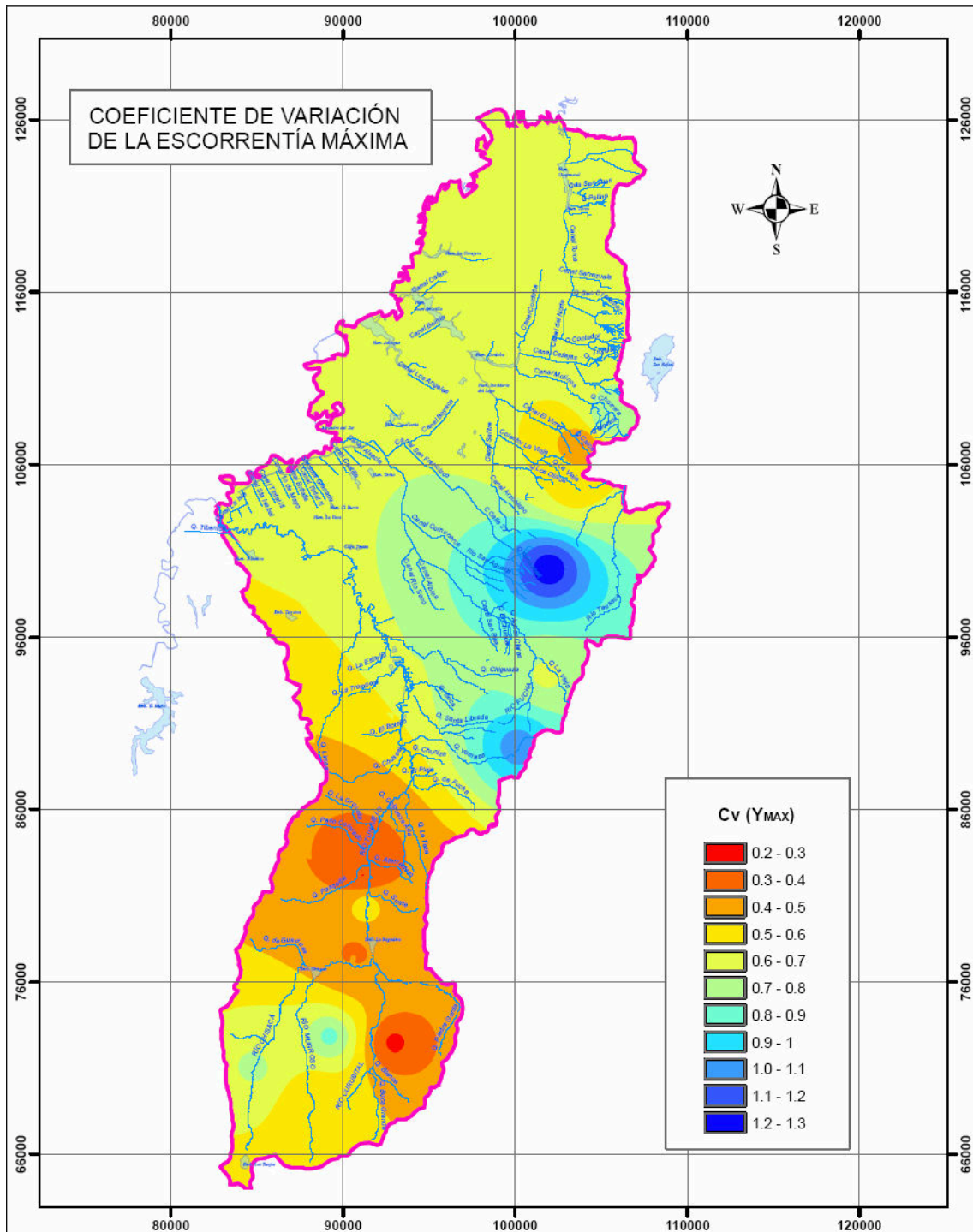


Figura 15. Coeficiente de variación de la escorrentía máxima

También se observa, que para el caso de escorrentía promedio el 70% aproximadamente del área de estudio tiene un coeficiente de variación menor a 0.4, mientras que en el de escorrentía máxima este mismo rango cubre el 5%. Esto indica que a nivel espacial hay mayor homogeneidad en el campo de los valores promedio respecto de los valores máximos.

En la cuenca del río Tunjuelo los coeficientes de variación oscilan entre 0.04 a 0.4 para las condiciones promedio y de 0.28 a 0.9 en el caso de la escorrentía máxima. De tal forma que el coeficiente de variación los valores máximos se incrementa en más del doble respecto del coeficiente de variación de los valores promedio.

Los coeficientes de variación superiores a 1 (que corresponde al rango más alto en el área de estudio) se presentan en sectores destino del el área de estudio para caso. Donde el de la escorrentía promedio se presenta en las cuencas de los canales Molinos y Calleja afluentes del Humedal Córdoba; mientras que el de la escorrentía máxima se presenta en la parte alta las cuencas de los ríos San Agustín, San Francisco y las quebradas Chiguaza, Yomasa y Santa Librada.

El cambio en la localización de los rangos altos en los dos campos analizados también permite ver, que en la cuenca del río Fucha los coeficientes de variación se incrementa a medida que los valores de escorrentía se acocan a los máximos, mientras que en la cuenca del río Juan Amarillo y Humedal Guaymaral ocurre la condición inversa.

Para tener una idea cuantitativa de las observaciones antes mencionadas se obtuvieron los promedios, máximos y mínimos para cada una de las zonas descritas en el numeral 2.4.2.1.3 de los campos del coeficiente de variación. Ver Tabla 10.

Tabla 10. Coeficientes de variación de Y_{med} y Y_{max} por zonas

ZONAS	Cv (Y_{med})			Cv (Y_{max})		
	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)	MÍNIMO (mm/año)	MÁXIMO (mm/año)	MEDIO (mm/año)
Zona 01	0,042	0,434	0,2532	0,280	1,047	0,5602
Zona 02	0,209	0,524	0,3965	0,615	1,257	0,7545
Zona 03	0,315	1,024	0,5465	0,398	1,092	0,6675

2.4.2.1.5 Función de autocorrelación espacial

La función de autocorrelación se construyó a partir de los valores diarios de caudal de cada una de las estaciones hidrológicas con información disponible localizadas sobre el área de estudio. Dicha función se graficó tanto de manera conjunta como para cada uno de los ríos importantes (Tunjuelo, Fucha, Juan Amarillo y Bogotá). Ver Figura 16 a la Figura 20.

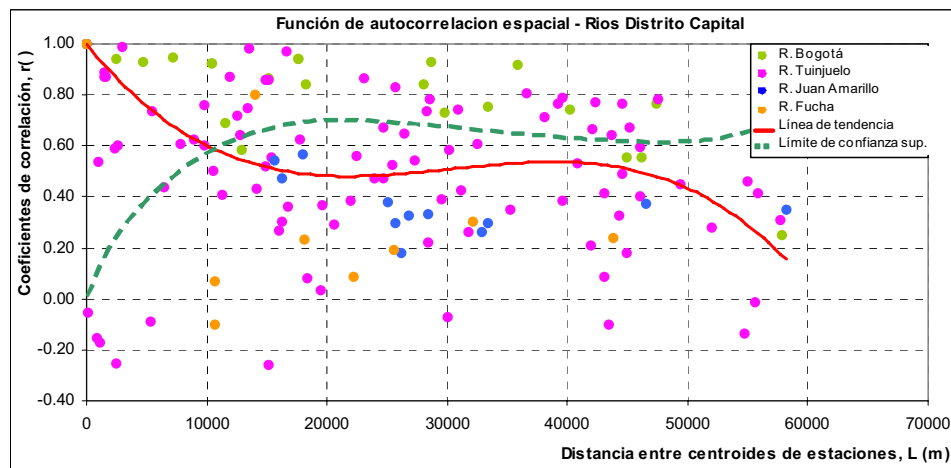


Figura 16. Función de auto correlación espacial – Ríos Distrito Capital

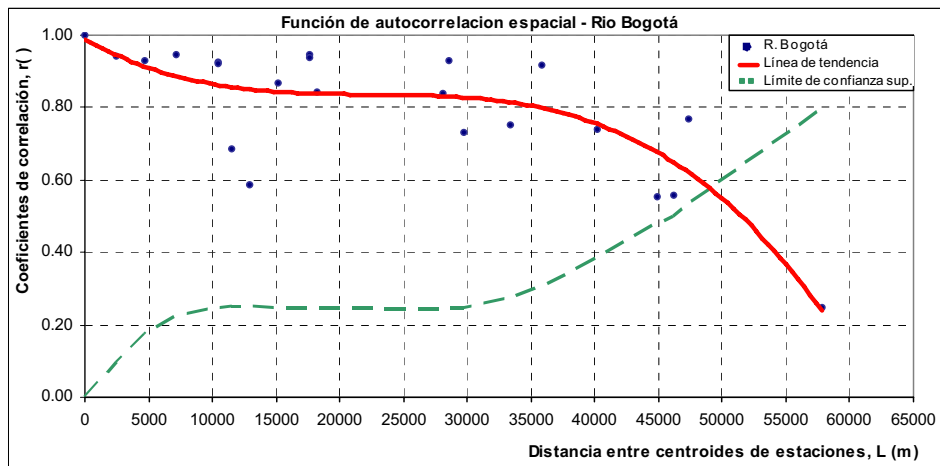


Figura 17. Función de auto correlación espacial – Río Bogotá

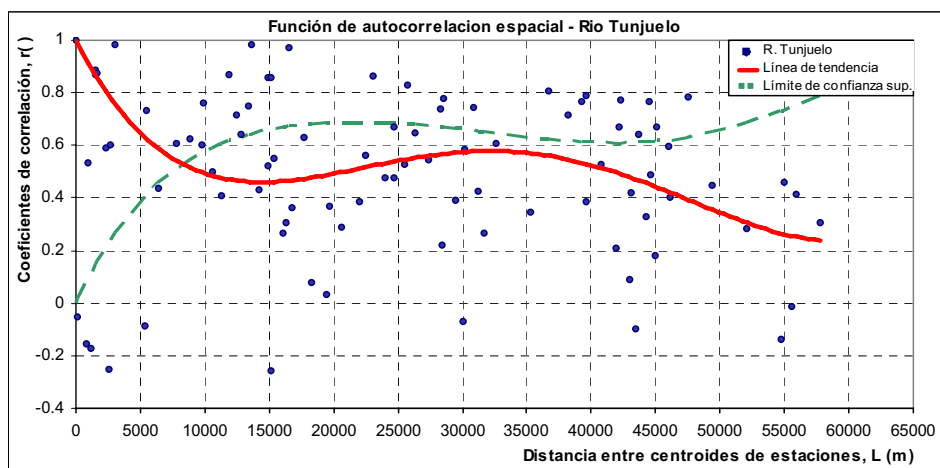


Figura 18. Función de auto correlación espacial – Río Tunjuelo

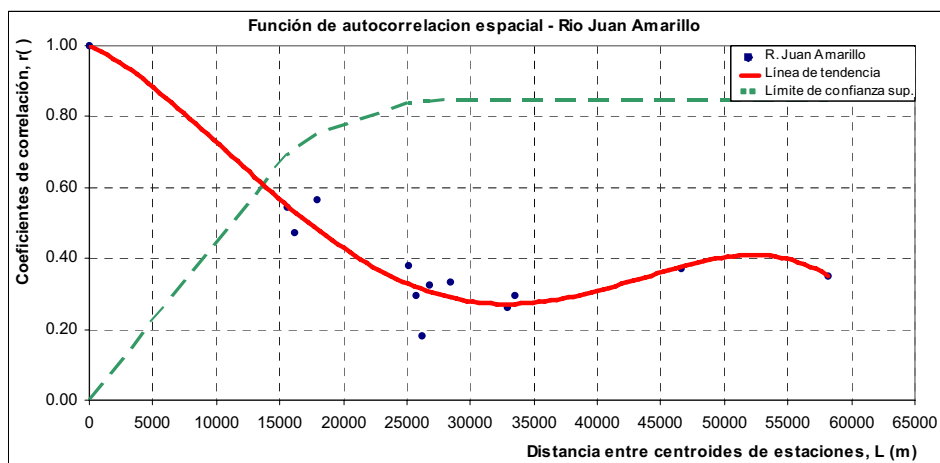


Figura 19. Función de auto correlación espacial – Río Juan Amarillo

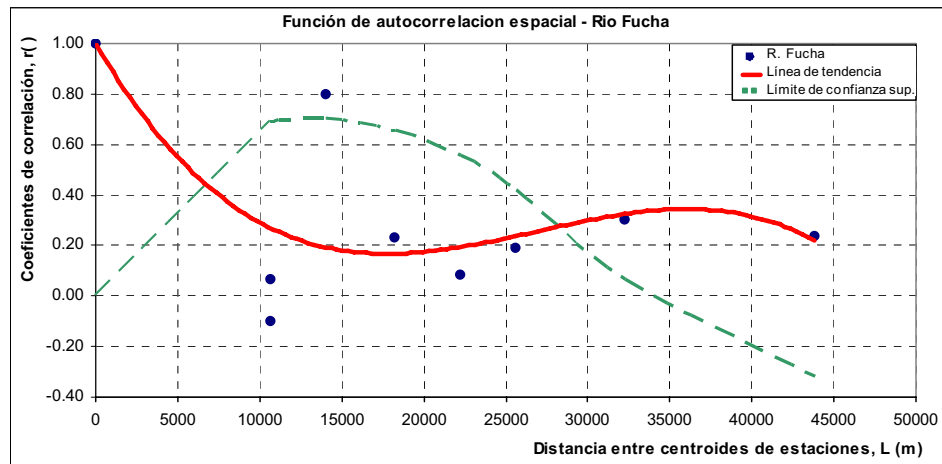


Figura 20 Función de auto correlación espacial – Río Fucha

Para cada gráfica de la Función de autocorrelación espacial se dibujaron la línea de tendencia media de los datos y el límite de confianza superior, de cuya intersección se determina el radio correlativo (L_0). Los valores obtenidos de L_0 para cada zona se listan a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Radio Correlativo por corrientes

Corrientes	L_0 (Km)
Ríos del Distrito Capital	11.3
Río Bogotá	49
Río Tunjuelo	9
Río Juan Amarillo	14.5
Río Fucha	7

En las funciones de autocorrelación (Figura 16 a la Figura 20) se puede apreciar que el río Tunjuelo presenta la mayor dispersión, al punto que en algunos sectores del río se pierde la memoria del proceso en una longitud de 200m, valor que corresponde al 0.3% de la longitud total del río. Estas anomalías están asociadas con la presencia de estructuras hidráulicas que controlan el flujo originado la pérdida del régimen natural de la cuenca y de una tendencia clara en la variación del coeficiente de correlación.

Dichas anomalías parecen perder peso cuando se presentan los eventos de inundación, ya que estructuras como los embalses de Chisacá y la Regadera⁹ alcanzan su cota de rebose perdiéndose el carácter de régimen controlado. De tal modo, que los coeficientes de correlación aumentan a medida que nos acercamos a los periodos de fuertes inviernos y por ende aumenta también el radio correlativo. Dicho comportamiento del coeficiente de correlación en el tiempo se evidencia en el informe de “Compilación y Análisis de Información Hidrológica”.

En la Figura 18 se puede ver que la línea de tendencia de la función de autocorrelación espacial para el río Tunjuelo obvia estas anomalías lo cual es consecuente con el hecho de que el fin primordial de la red es la emisión de alertas tempranas por eventos de inundación.

Los otros ríos no cuentan con tantos puntos de monitoreo dentro del área de estudio, sin embargo se pueden apreciar tendencias.

⁹ Los embalses de La Regadera y Chisacá fueron diseñados con fines de abastecimiento y no para mitigación de inundaciones, razón por la cual, cuando se presentan temporadas invernales fuertes los embalses alcanzan rápidamente la cota de desbordamiento.

El río Bogotá (Figura 17) tiene el mayor radio correlativo que es acorde a la magnitud de la cuenca. Además, presenta valores de correlación por encima del límite de confianza indicando que la memoria del proceso se conserva en los puntos de monitoreo que se han implementado hasta el momento.

Por otro lado, en la función de autocorrelación del río Juan Amarillo (Figura 19) se observa una baja dispersión en los valores mostrando una tendencia definida. Sin embargo, los puntos de monitoreo utilizados para el análisis están por fuera del radio correlativo lo que indica que entre dichas estaciones no se conserva la memoria del proceso; por tanto, no es conveniente restituir la información que se pierde durante un periodo de “falla” de alguna de estas estaciones con información de otra que haya funcionado.

Finalmente, el radio correlativo del río Fucha (Figura 20) es el más pequeño entre los ríos analizados cuyo valor está asociado con la heterogeneidad de la distribución de la escorrentía a lo largo de la cuenca, y en otro tanto, a la carencia de información disponible para hacer el análisis.

2.4.2.2 Número óptimo de estaciones para cuencas pequeñas

La estimación de la densidad óptima se hizo de acuerdo a la zonificación antes establecida y considerando 3 escenarios representativos de diferentes condiciones hidroclimáticas. Esto con el fin de hacer una comparación de la densidad óptima de estaciones requerida para cada escenario y evaluar la efectividad de la red obtenida para cada alternativa en la referente a los eventos de inundación. Los escenarios se describen a continuación en detalle.

2.4.2.2.1 Escenario 1 - Condiciones hidroclimáticas promedio

Este escenario representa el estado promedio de las variables hidroclimáticas, dicho en otras palabras, el estado normal del río que no representa un riesgo a la población que habita en sus riveras. Además permite definir cuales sectores del área de estudio son los que generalmente aportan más a la corriente principal y que probablemente en una inundación pueden ocasionar mayores problemas, por tal motivo es necesario prestarle mayor atención (monitoreo). Para el cálculo de número óptimo de estaciones se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El error de la tecnología de medición de la escorrentía, σ (que es equivalente al del caudal) debe ser igual o inferior al 20% para que la red sea capaz de ofrecer información más certera de las variables hidrológicas monitoreadas; de tal modo que contribuyan a que los modelos de pronóstico de niveles (de una inundación) logren un mayor rango de confiabilidad. Por otro lado, es difícil garantizar un error $\sigma \leq 10\%$, de tal modo que los cálculos se estimaron para valores de $\sigma = 10, 15, 20\%$. Dentro de dicho rango se considera: el error de los equipos, el error humano y el error de la curva de gasto.
- El criterio de área representativa no se tendrá en cuenta, debido a que las anomalías en las cuencas pequeñas (Tunjuelo, Fucha y Juan Amarillo) tiene mayor peso en su comportamiento que el mismo régimen hidroclimático, lo que dificulta establecer un área representativa.

Con base en lo anterior, a los análisis previos realizados y atendiendo a los criterios de gradiente, correlativo y área representativa que se escriben en el numeral 2.3.1.2 se calculó el número óptimo de estaciones. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 12 a la Tabla 14.

Tabla 12. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 1 ($\sigma=10\%$)

Cuenca	Zona Análisis	Y_{MED} (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área Óptima (Km ²)	No. Óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	541.5	0.029	0.253	0.11	400	26.8	2.0	14.4	28
FUCHA	Zona 02	449.0	0.036	0.396	0.14	200	12.4	0.2	6.3	32
JUAN A.	Zona 03	378.8	0.013	0.546	0.07	266	70.6	0.2	35.4	8
TOTAL									68.0	

Tabla 13. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 1 ($\sigma=15\%$)

Cuenca	Zona Análisis	Y_{MED} (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área Óptima (Km ²)	No. Optimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	541.5	0.029	0.253	0.11	400	60.3	10.0	35.1	11
FUCHA	Zona 02	449.0	0.036	0.396	0.14	200	27.9	1.0	14.5	14
JUAN A.	Zona 03	378.8	0.013	0.546	0.07	266	158.9	1.2	80.0	3
TOTAL									28.0	

Tabla 14. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 1 ($\sigma=20\%$)

Cuenca	Zona Análisis	Y_{MED} (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área Óptima (Km ²)	No. Optimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	541.5	0.029	0.253	0.11	400	107.2	31.5	69.4	6
FUCHA	Zona 02	449.0	0.036	0.396	0.14	200	49.6	3.2	26.4	8
JUAN A.	Zona 03	378.8	0.013	0.546	0.07	266	282.5	3.8	143.1	2
TOTAL									16.0	

Los resultados muestran que las cuencas donde se localizarán el mayor número de estaciones son las del río Tunjuelo y Fucha, la cuales presentaron poca homogeneidad en la distribución de la escorrentía. De manera diferente, la cuenca del río Juan Amarillo no presenta cambios significativos en la escorrentía, conservándose relativamente homogénea en el espacio, requiere de muy pocas estaciones para su monitoreo.

También se puede observar en los resultados, que el error sistemático (σ) es inversamente proporcional al número de estaciones. Por tanto, una demanda de un error bajo en las mediciones debe ir acorde con una red hidrológica mas densa, lo que visto en términos de costos es poco favorable. Por otra parte, reducir el error a valores inferiores al 20% resulta costoso y difícil de lograr, dada la tecnología de medición existente en el país. Por esta razón se recomienda que red hidrológica se diseño u optimice para un error sistemático del 20%, valor que se ajusta más a la realidad.

De acuerdo a dicho error el número de estaciones de régimen general que debe existir como mínimo es de 16 para condiciones climáticas promedio.

2.4.2.2.2 Condiciones hidroclimáticas de eventos Máximos

Este escenario hace referencia a las condiciones hidroclimáticas en las que generalmente se presentan eventos significativos de inundación. Para evaluar esta condición se encontró que los valores que mejor representan eventos de inundación son los valores de escorrentía con un tiempo de excedencia iguales o menores al 5% (esto se explica en detallan en el numeral 2.4.2.1.1).

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente se propusieron dos escenarios más:

2.4.2.2.3 Escenario 2 – Tiempo de excedencia del 5%

Considera los valores de escorrentía con un tiempo de excedencia de 5%. Esta condición reúne eventos de inundación ocurridos en la mayoría de las cuencas del área de estudio. También algunas incluyen crecientes que no necesariamente ocasionaron inundaciones.

Para el cálculo del número óptimo de estaciones tanto de este escenario como del Escenario 3 se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El error σ se estimó para el 10, 15, 20% de acuerdo a lo descrito para el Escenario 1.
- Se obvia el criterio de área representativa porque no es aplicable a cuencas pequeñas y con condiciones anómalas significativas.
- Dado que los valores de la escorrentía para los tiempos de excedencia del 2 y 5% fueron deducidos a partir de los valores medios (ver numeral 2.4.2.1.1 y Figura 7) no hay una serie histórica que permita establecer el Coeficiente de Variación (Cv) para estos valores. Por tal razón se asume que los valores máximos de escorrentía varían de igual manera que los valores de escorrentía con tiempos de excedencia del 2 y 5%; es decir, que el coeficiente de variación de los valores de escorrentía máximos (ver Tabla 10) son equivalentes a los coeficientes de variación de los valores de escorrentía con tiempos de excedencia del 2 y 5%. Esto, teniendo en cuenta que los valores con tiempos de excedencia del 2 y 5% son representativos de los valores máximos.

Los resultados de aplicar los criterios para la red de referencia general para el Escenario 2 se indican en la Tabla 15 a la Tabla 17.

Tabla 15. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 2 ($\sigma=10\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=5\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	1586	0.09	0.56	0.11	400	27.2	0.1	13.6	29
FUCHA	Zona 02	1334	0.12	0.75	0.14	200	10.6	0.0	5.3	38
JUAN A.	Zona 03	1138	0.04	0.67	0.07	266	60.3	0.1	30.2	9
TOTAL									76.0	

Tabla 16. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 2 ($\sigma=15\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=5\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	1586	0.09	0.56	0.11	400	61.1	0.4	30.8	13
FUCHA	Zona 02	1334	0.12	0.75	0.14	200	23.8	0.1	11.9	17
JUAN A.	Zona 03	1138	0.04	0.67	0.07	266	135.6	0.5	68.1	4
TOTAL									34.0	

Tabla 17. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 2 ($\sigma=20\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=5\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	1586	0.09	0.56	0.11	400	108.6	1.3	55.0	7
FUCHA	Zona 02	1334	0.12	0.75	0.14	200	42.3	0.2	21.2	9
JUAN A.	Zona 03	1138	0.04	0.67	0.07	266	241.0	1.7	121.4	2
TOTAL									18.0	

Teniendo en cuenta el error recomendado del 20%, el número de estaciones de régimen general para este escenario es 18.

2.4.2.2.4 Escenario 3 – Tiempo de excedencia del 2%

Considera valores de escorrentía con un tiempo de excedencia del 2%. Esta condición incluye eventos de inundación bastantes significativos, en especial en las corrientes importantes (Río Bogotá, Tunjuelo, Juan Amarillo y Fucha), excluye algunos eventos de inundación que se encuentran dentro del rango del tiempo de excedencia del 5%. Los resultados para este escenario se resumen a continuación, en la Tabla 18 a la Tabla 20.

Tabla 18. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 3 ($\sigma=10\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=2\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	2260	0.11	0.56	0.11	400	33.9	0.1	17.0	24
FUCHA	Zona 02	1867	0.16	0.75	0.14	200	10.7	0.0	5.4	37
JUAN A.	Zona 03	1595	0.06	0.67	0.07	266	48.2	0.1	24.2	11
TOTAL										720

Tabla 19. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 3 ($\sigma=15\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=2\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	2260	0.11	0.56	0.11	400	76.4	0.4	38.4	10
FUCHA	Zona 02	1867	0.16	0.75	0.14	200	24.2	0.1	12.1	17
JUAN A.	Zona 03	1595	0.06	0.67	0.07	266	108.5	0.5	54.5	5
TOTAL										320

Tabla 20. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Escenario 3 ($\sigma=20\%$)

Cuenca	Zona Análisis	$Y_{Te=2\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	Cv	a (1/Km)	Área Zona (Km ²)	Área de Gradiente (Km ²)	Área Correlativa (Km ²)	Área óptima (Km ²)	No. óptimo de Estaciones
TUNJUELO	Zona 01	2260	0.11	0.56	0.11	400	135.8	1.3	68.5	6
FUCHA	Zona 02	1867	0.16	0.75	0.14	200	42.9	0.2	21.6	9
JUAN A.	Zona 03	1595	0.06	0.67	0.07	266	193.0	1.7	97.3	3
TOTAL										180

Teniendo en cuenta el error sistemático recomendado del 20% el número de estaciones es 18, al igual que para el escenario 2. Esto permite suponer que al alcanzar un error de medición del 20%, el número de estaciones es independiente de la magnitud de creciente. Es decir, que independiente donde se ubique la creciente dentro del rango de los tiempos de excedencia menores al 5%, para un error de medición esperado del 20%, el número óptimo de estaciones para monitorear dicha creciente dentro del área de estudio es 18.

Pero en lo referente al número de estaciones por zona, este valor varía de un escenario a otro, en cuyo caso se recomienda tomar los valores obtenidos en el Escenario 2, debido a que el Escenario 2 es el que compila el mayor número de eventos de inundación siendo así mas representativo para el pronóstico de crecientes que originen inundaciones de un amplio rango de magnitudes.

2.4.2.3 Número óptimo de estaciones para el río Bogotá

Para estimar el número de estaciones que estarían localizadas a lo largo del río Bogotá en el tramo que colinda con el Distrito Capital (cuya longitud es de 70 Km), se evaluaron los criterios Correlativos y de Gradiente en términos de la longitud y no del área. Es decir, que se estimará la longitud de gradiente (l_{grad}) y la longitud correlativa (l_{corr}) tal como lo propone el método de Karasiov originalmente.

El criterio de gradiente en términos de longitud se define así:

$$l_{grad} \geq \frac{2\sqrt{2}\sigma Y_0}{grad(Y)} \quad (21)$$

- Donde
- l_{grad} – Longitud entre los nodos necesaria para que el incremento de "Y" sea mayor que el margen de error de la medición
 - Y_0 – Norma de Escorrentía
 - $grad(Y)$ – Gradiente de Y
 - σ – Error sistemático de medición

Para este caso, la Norma de escorrentía del tramo del río Bogotá a analizar es el promedio de los valores de escorrentía reportado por cada una de las estaciones localizadas a lo largo del tramo de interés. Dichos valores corresponden a los que se listan en la Tabla 4 y comprenden las estaciones de la 1 a la 7.

El gradiente es entonces la variación de la escorrentía con respecto a la longitud, así:

$$grad(Y) = \frac{\Delta Y}{L} \quad (22)$$

- Donde
- ΔY – Cambio de escorrentía entre dos puntos de monitoreo sobre una misma corriente.
 - L – Longitud entre los centro idees de los puntos de monitoreo (estaciones)

Los valores de gradiente promedio para cada escenario de escorrentía son entonces: la razón entre el cambio de escorrentía del inicio al final del tramo de estudio y la longitud del tramo. Para el caso, se tomaron los valores de escorrentía de las estaciones 3 y 5 (ver Tabla 4) que se encuentra en los puntos extremos del tramo de estudio a una distancia de 58 Km.

Por su parte, el criterio correlativo en términos de longitud se define como sigue:

$$l_{correlativa} \leq \frac{\sigma^2}{aC_v^2} \quad (23)$$

- Donde
- $l_{correlativa}$ – Área correlativa, después de la cual se pierde la conexión estadística entre estaciones
 - C_v – Coeficiente de Variación de "Y"

$$a = \frac{1}{l_0}$$

Donde l_0 es el radio correlativo, el cual corresponde al estimado a partir de la función de autocorrelación espacial, cuyo valor para el río Bogota es de 49Km (ver Tabla 11).

El coeficiente de variación (C_v) de la escorrentía para el tramo de análisis será el promedio de los coeficientes de variación calculado para cada estación que se localice en el tramo de estudio (ver Tabla 9). De tal modo para el tramo del río Bogotá analizado, el coeficiente de variación de los valores de escorrentía media es de 0.25 mientras que para los valores de escorrentía máxima es de 0.27.

A partir de las consideraciones anteriores y de la aplicación de las ecuaciones 21 y 22 se calculó la longitud correlativa y de gradiente del río Bogotá, para los diferentes escenarios y errores sistemáticos de medición analizados para el caso de las cuencas pequeñas. Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 21 a la Tabla 23.

Tabla 21. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Río Bogotá, Esc. – 1

Y_{MED} (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	σ	Long. Zona (Km)	Long. de Gradiente (Km)	Long. Correlativa (Km)	Long. Óptima (Km)	No. Óptimo de Estaciones
181	0.0025	0.25	0.02	10%	70	20	8.0	14.3	5
				15%		31	18.1	24.4	3
				20%		41	32.1	36.5	2

Tabla 22. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Río Bogotá, Esc. – 2

$Y_{Te=5\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	σ	Long. Zona (Km)	Long. de Gradiente (Km)	Long. Correlativa (Km)	Long. Óptima (Km)	No. Óptimo de Estaciones
413	0.0129	0.27	0.02	10%	70	9	6.5	7.8	9
				15%		14	14.7	14.1	5
				20%		18	26.1	22.1	3

Tabla 23. Resultados de la aplicación de criterios para la red de Referencia General – Río Bogotá, Esc. – 3

$Y_{Te=2\%}$ (mm/año)	Grad (mm/m)	C_v	a (1/Km)	σ	Long. Zona (Km)	Long. de Gradiente (Km)	Long. Correlativa (Km)	Long. Óptima (Km)	No. Óptimo de Estaciones
539	0.0100	0.27	0.02	10%	70	15	6.5	10.9	6
				15%		23	14.7	18.7	4
				20%		30	26.1	28.2	2

Los resultados de la aplicación de los criterios para la red de Referencia General en el río Bogotá muestran que para el error sistemático recomendado del 20% el número de estaciones para condiciones hidroclimáticas medias y extremas (Escenarios 1 al 3) el número de estaciones difiere en 2 a 3. En este caso se recomienda tomar el número de estaciones calculadas a partir del Escenario – 2, ya que este escenario compila el mayor número de eventos de inundación, que al considerar la frecuencia de inundaciones que se ha registrado en el río Bogotá¹⁰ resulta adecuado.

En conclusión se recomienda un total de 3 estaciones espaciadas 22 Km a lo largo del tramo de análisis. Además se debe incluir otra estación al inicio del tramo (dicho tramo no inicia en el nacimiento del río sino en un punto intermedio). Por tanto, en total se requieren 4 estaciones.

2.4.3 Evaluación de los criterios para la red de referencia Específica

Luego de definir la red de referencia general, es necesario establecer el número de estaciones de referencia específica, siendo consecuentes con la metodología de Karasiov.

Dicha red específica tendrá como fin cumplir con requerimientos locales, específicamente de administración y utilización del recurso. Además, proporcionar una mayor resolución a la red, útil para el seguimiento y pronósticos de niveles, principalmente en los afluentes de las principales corrientes del Distrito Capital que

¹⁰ Los análisis de frecuencias de las inundaciones en el Distrito Capital se describe en detalle en el capítulo de “Análisis de Información” del Informe de “Compilación y Análisis de Información” entregado anteriormente.

aportan caudales importantes que pueden afectar la corriente principal durante una creciente o en mayor grado durante una inundación.

Para ello es necesario establecer el número de afluentes de las corrientes principales (basado en la zonificación propuesta) que aportan caudales superiores al error de medición (σ) a partir del siguiente procedimiento:

2.4.3.1 Paso 1 – Número de orden de la cuenca:

Definir el número de orden de la cuenca hasta cada punto de monitoreo (estaciones hidrológicas con información de caudal – ver Figura 22) junto con el número de corrientes de cada orden.

A partir de la información disponible y nivel de detalle en cuanto a hidrografía se obtuvo los resultados que se listan en la Tabla 24 para cada estación hidrológica.¹¹

Tabla 24. Número de orden de las cuencas hasta cada punto de monitoreo

Estación No.	No. de Orden, n	No. de Corrientes de orden 1	No. de Corrientes de orden 2	No. de Corrientes de orden 3	No. de Corrientes de orden 4	No. de Corrientes de orden 5	No. de Corrientes de orden 6
1	5	142	31	9	3	1	
2	6	242	58	18	5	2	1
3	5	141	31	9	3	1	
4	5	153	33	10	3	1	
5	6	792	204	55	12	3	1
6	6	374	93	22	6	2	1
7	6	244	58	18	5	2	1
8	4	90	21	4	1		
9	5	322	87	26	5	1	
10	5	387	102	31	5	1	
11	4	90	21	4	1		
12	5	321	87	26	5	1	
13	3	37	9	1			
14	4	36	7	2	1		
15	5	58	21	6	2	1	
17	5	174	48	10	3	1	
18	5	417	111	33	6	1	
19	5	417	111	33	6	1	
20	5	417	111	33	6	1	
21	5	386	102	31	5	1	
22	2	3	1				
23	3	5	2	1			
24	3	6	2	1			
25	3	16	6	1			
26	3	25	7	1			
28	4	64	20	3	1		

¹¹ La numeración dada a las estaciones hidrológicas tanto en la Figura 22 como en la Tabla 4 y la Tabla 24 es la misma definida en el informe de “Compilación y Análisis de Información”. Los atributos de cada estación se encuentran en detalle en el capítulo de Información recopilada en el ítem de “Información Hidrometeorológica”

2.4.3.2 Paso 2 – Construcción de la función $n=f(Q)$:

Construir la función $n = f(Q)$ definida en la primera Ley de Horton para el caso específico del Distrito Capital, a partir de los valores de caudal medio (Q_{MED}) y con tiempo de excedencia del 2 y 5% ($Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5\%}$) para cada estación.

Los valores de $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5\%}$ se dedujeron de la misma forma que los de $Y_{Te=2\%}$ y $Y_{Te=5\%}$, empleando las curvas de regresiones que se aprecian en la Figura 21.

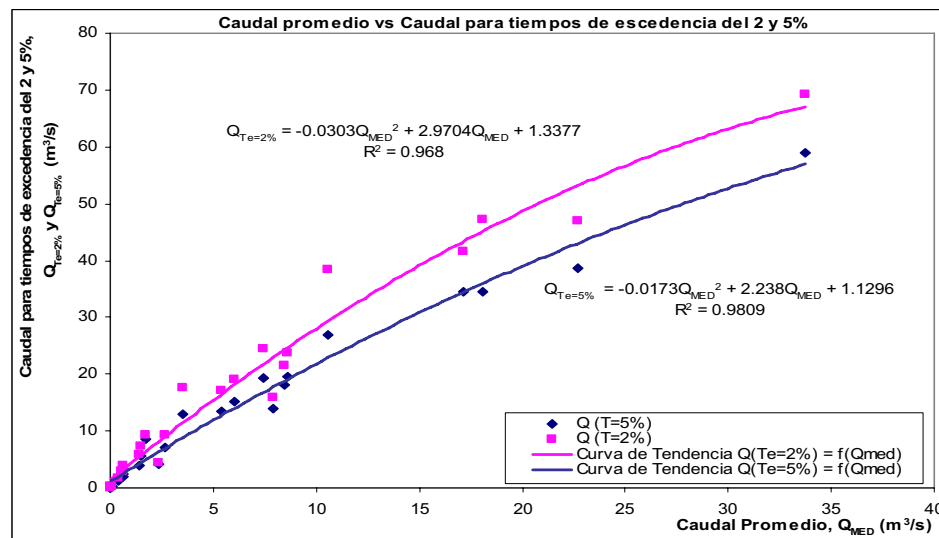


Figura 21. Regresiones para el cálculo de $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5\%}$

Las curvas de $n = f(Q)$ obtenidas para cada uno de los caudales Q_{MED} , $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5\%}$ junto con los ecuaciones encontradas se aprecian en la Figura 23 a Figura 25.

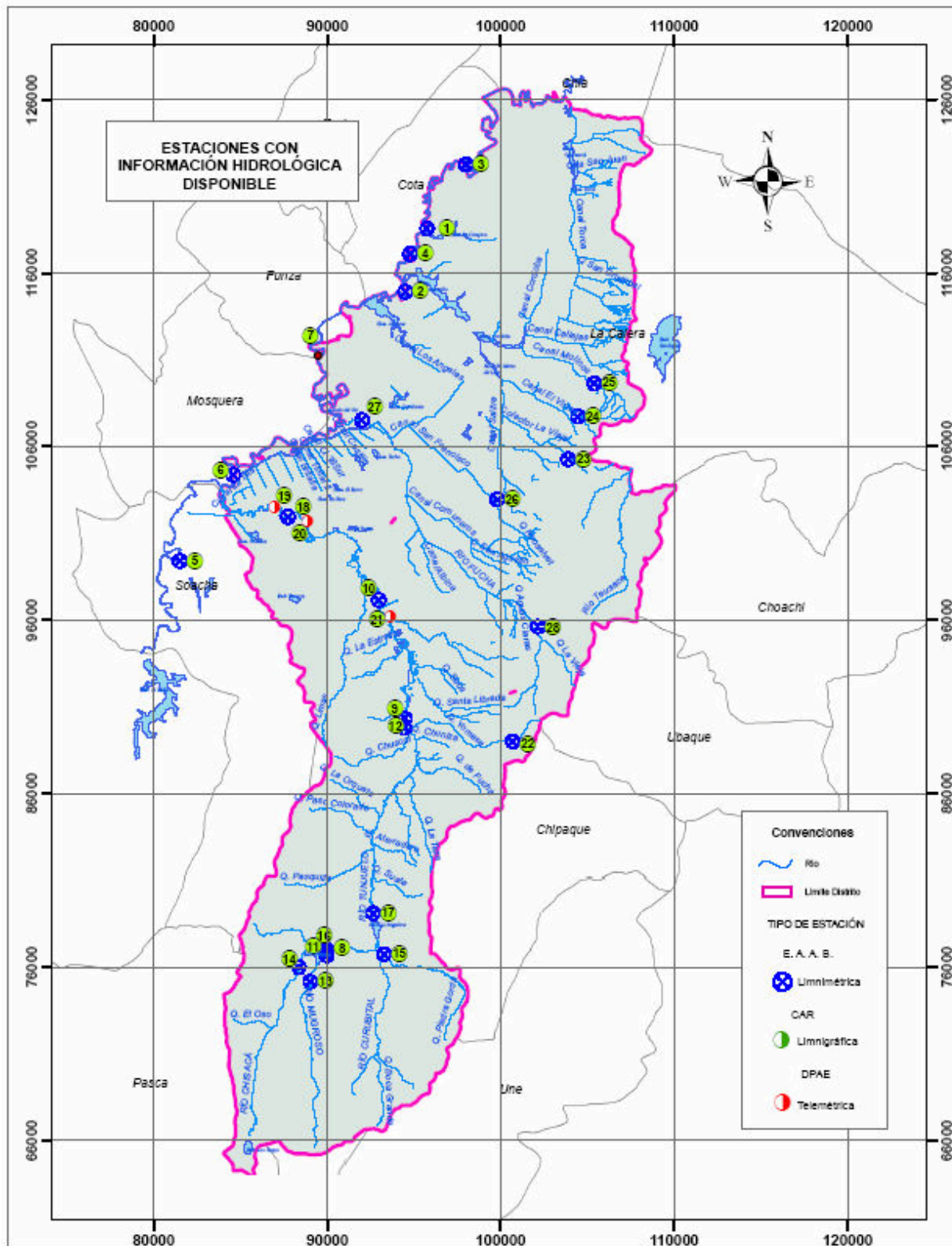


Figura 22 Estaciones Hidrológicas con información disponible

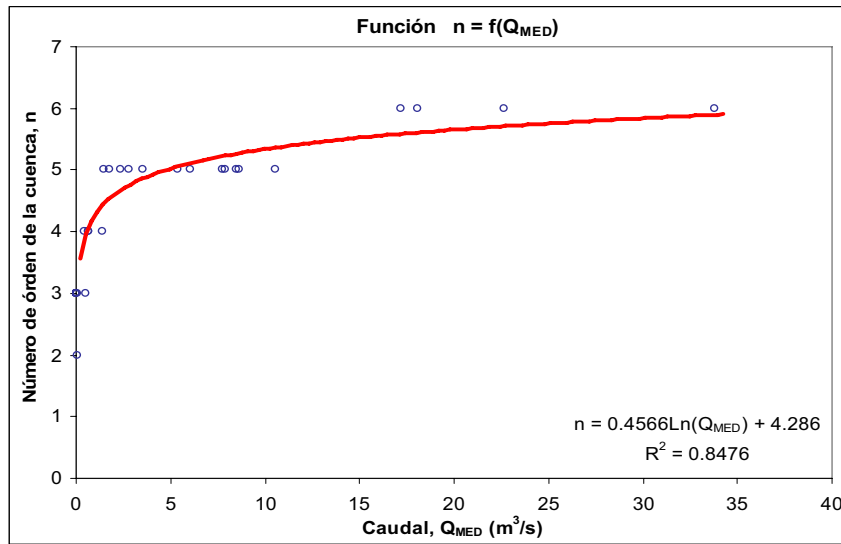


Figura 23. Función $n = f(Q_{MED})$ – Aplicación de la 1° Ley de Horton

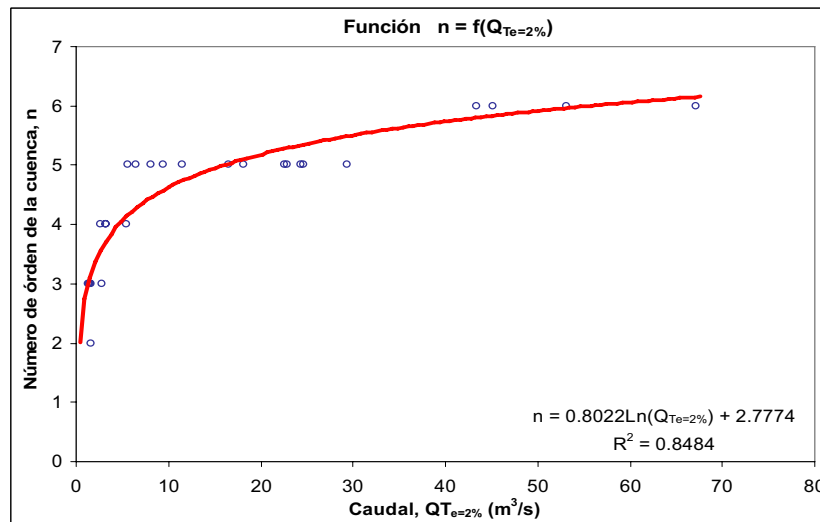


Figura 24. Función $n = f(Q_{Te=2\%})$ – Aplicación de la 1° Ley de Horton

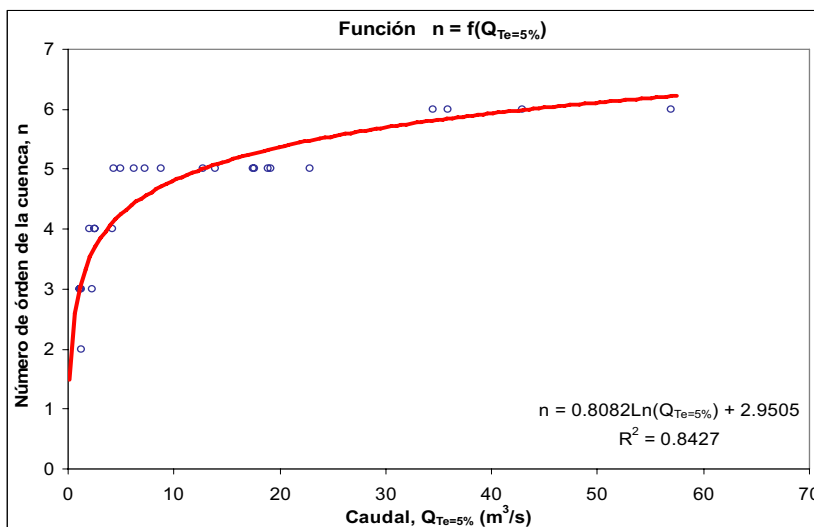


Figura 25. Función $n = f(Q_{Te=5\%})$ – Aplicación de la 1° Ley de Horton

2.4.3.3 Paso 3 – Definición del error de la tecnología de medición (σ):

Definición del error de la tecnología (σ): Los errores de la tecnología de medición a tener en cuenta son los propuestos a lo largo del estudio, es decir, 10, 15 y 20% por las razones ya explicadas y cuyo valor recomendado es del 20%.

2.4.3.4 Paso 4 – Cálculo del caudal promedio por zonas de análisis:

De acuerdo a la zonificación del área (ver Figura 13) de estudio se calculó el caudal Q_{MED} , $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5}$ para las tres zonas. La cual se deduce de los valores de escorrentía Y_{MED} , $Y_{Te=2\%}$ y $Y_{Te=5}$ respectivamente y del área de la zona, a partir de la siguiente igualdad:

$$Q = 3.17 \times 10^{-5} \cdot Y \cdot A \quad (24)$$

- Donde Q – Caudal Q_{MED} , $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5}$ promedio de cada zona, [m^3/s]
 Y – Escorrentía: Y_{MED} , $Y_{Te=2\%}$ y $Y_{Te=5}$ promedio para cada zona, [$mm/año$]
 A – Área de la zona, [Km^2]

En la Tabla 25 se resumen los caudales Q_{MED} , $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5}$ promedio de cada zona.

Tabla 25. Cálculo de caudal promedio por zonas de análisis

Zona Análisis	Cuenca	Área Zona, A (Km^2)	Y_{MED} ($mm/año$)	$Y_{Te=5\%}$ ($mm/año$)	$Y_{Te=2\%}$ ($mm/año$)	Q_{MED} (m^3/s)	$Q_{Te=5\%}$ (m^3/s)	$Q_{Te=2\%}$ (m^3/s)
Zona 01	Río Tunjuelo	400	542	1586	2260	6.9	20.1	28.7
Zona 02	Río Fucha	200	449	1334	1867	2.8	8.5	11.9
Zona 03	Río Juan Amarillo	266	379	1138	1595	3.2	9.6	13.4

2.4.3.5 Paso 5 – Cálculo de k :

Calcular el mínimo número de orden (k) de las subcuencas que aportan un caudal igual o mayor al error de la tecnología de medición ($Q_{\sigma} = Q \times \sigma$). Para ello se aplicaron las funciones $n=f(Q)$ deducidas en el paso 2 a la fracción “ σ ” del caudal total de la zona de análisis. Para mayor claridad tomemos el siguiente ejemplo:

Para un error de medición de 20% y un caudal total de la zona de análisis de 6.9 m³/s (correspondiente a la Zona 01) las subcuencas que requieren monitoreo son la cuentan con un caudal igual o mayor a $Q_{\sigma} = 6.9 \times 20\% = 1.4$ m³/s. Finalmente, el número de orden de la subcuenca para dicho caudal será estimado a partir de la función $n=f(Q)$ que se sita en la Figura 23, de tal modo que:

$$k = 0.4566 \times \ln(Q_{\sigma}) + 4.286 = 0.4566 \ln(1.4) + 4.286 = 4$$

De esta misma manera se calcula el valor de “ k ” para los diferentes errores “ σ ” y caudales $Q_{Te=2\%}$ y $Q_{Te=5\%}$. Los resultados se indican en la Tabla 27 a la Tabla 29.

2.4.3.6 Paso 6 – Cálculo del coeficiente de bifurcación (r_b):

Se estimaron los coeficientes de bifurcación de Horton (r_b) para cada una de las 3 zonas de análisis a partir de la hidrografía disponible. Los resultados se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26. Coeficientes de bifurcación (r_b)

Zona de Análisis	Cuenca	r_b
Zona 01	Río Tunjuelo	3.72
Zona 02	Río Fucha	3.38
Zona 03	Río Juan Amarillo	3.56

2.4.3.7 Paso 7 – Cálculo de S_k :

Finalmente se calcula el número de corrientes de orden “ k ” aplicando la 2° ley de Horton (Ecuación 19). Un ejemplo de este cálculo es el siguiente:

Continuado con el ejemplo anterior, tenemos que para la Zona 1 (Río Tunjuelo) el valor de k para los caudales Q_{MED} y un error (σ) del 20% es de 4, y su coeficiente de bifurcación (r_b) es de 3.72, de modo el mínimo número de afluentes del río Tunjuelo que aportan caudales superiores al error de medición (σ) es S_k y se calcula como sigue:

$$S_k = r_b^{n-k-1} (r_b - 1) = 3.72^{5-4-1} (3.72 - 1) = 3$$

Los resúmenes de los resultados para cada uno de los diferentes errores y de los escenarios planteados (Q_{MED} , $Q_{Te=5\%}$ y $Q_{Te=2\%}$) aparecen en la Tabla 27 a la Tabla 29.

Tabla 27. Número óptimo de estaciones de referencia específica – Escenario 1

Zona Análisis	Cuenca	Q_{MED} (m ³ /s)	No. de Orden de la Zona, n	σ	Q_{σ} (m ³ /s)	Mínimo Orden de Afluentes para considerar, k	r_b	Número de Estaciones de Régimen Específico, S_k
Zona 01	Río Tunjuelo	6.9	5	0.10	0.7	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	2.8	5		0.3	4	3.38	2
Zona 03	Río Juan Amarillo	3.2	5		0.3	4	3.56	3
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 10\%$								8

Zona 01	Río Tunjuelo	6.9	5	0.15	1.0	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	2.8	5		0.4	4	3.38	2
Zona 03	Río Juan Amarillo	3.2	5		0.5	4	3.56	3
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 15\%$								8
Zona 01	Río Tunjuelo	6.9	5	0.20	1.4	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	2.8	5		0.6	4	3.38	2
Zona 03	Río Juan Amarillo	3.2	5		0.6	4	3.56	3
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 20\%$								8

Tabla 28. Número óptimo de estaciones de referencia específica – Escenario 2

Zona Análisis	Cuenca	$Q_{Te=5\%}$ (m ³ /s)	No. de Orden de la Zona, n	σ	Q_{σ} (m ³ /s)	Mínimo Orden de Afluentes para considerar, k	r_b	Número de Estaciones de Régimen Específico, S_k
Zona 01	Río Tunjuelo	20.1	5	0.10	2.0	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	8.5	5		0.8	3	3.38	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	9.6	5		1.0	3	3.56	9
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 10\%$								20
Zona 01	Río Tunjuelo	20.1	5	0.15	3.0	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	8.5	5		1.3	3	3.38	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	9.6	5		1.4	3	3.56	9
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 15\%$								20
Zona 01	Río Tunjuelo	20.1	5	0.20	4.0	4	3.72	3
Zona 02	Río Fucha	8.5	5		1.7	3	3.38	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	9.6	5		1.9	3	3.56	9
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 20\%$								20

Tabla 29. Número óptimo de estaciones de referencia específica – Escenario 3

Zona Análisis	Cuenca	$Q_{Te=2\%}$ (m ³ /s)	No. de Orden de la Zona, n	σ	Q_{σ} (m ³ /s)	Mínimo Orden de Afluentes para considerar, k	r_b	Número de Estaciones de Régimen Específico, S_k
Zona 01	Río Tunjuelo	28.7	6	0.10	2.9	4	3.72	10
Zona 02	Río Fucha	11.9	5		1.2	3	3.38	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	13.4	5		1.3	3	3.56	9
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 10\%$								27
Zona 01	Río Tunjuelo	28.7	6	0.15	4.3	4	3.72	10
Zona 02	Río Fucha	11.9	5		1.8	3	3.38	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	13.4	5		2.0	4	3.56	3
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 15\%$								21
Zona 01	Río Tunjuelo	28.7	6	0.20	5.7	4	3.72	10
Zona 02	Río Fucha	11.9	5		2.4	4	3.38	2
Zona 03	Río Juan Amarillo	13.4	5		2.7	4	3.56	3
Total de estaciones de referencia específica en el Distrito Capital para $\sigma = 20\%$								15

De acuerdo al error (σ) recomendado del 20% y que el Escenario 2 es el que se ajusta más al objetivo primordial de la red a optimizar, el número óptimo de estaciones de referencia específica para el Distrito Capital es de 20.

2.4.4 Red optimizada

El número total de estaciones de referencia general y específica recomendadas para el Distrito capital se resumen en la Tabla 30 por zonas de análisis.

Tabla 30. Número total de estaciones hidrológicas para el Distrito Capital

Zonas de Análisis	Cuenca	No. de Estaciones de Referencia General	No. de Estaciones de Referencia Específica
Zona 01	Río Tunjuelo	7	3
Zona 02	Río Fucha	9	8
Zona 03	Río Juan Amarillo	2	9
Zona 04	Río Bogotá	4	-
Total de estaciones en el Distrito Capital		22	20

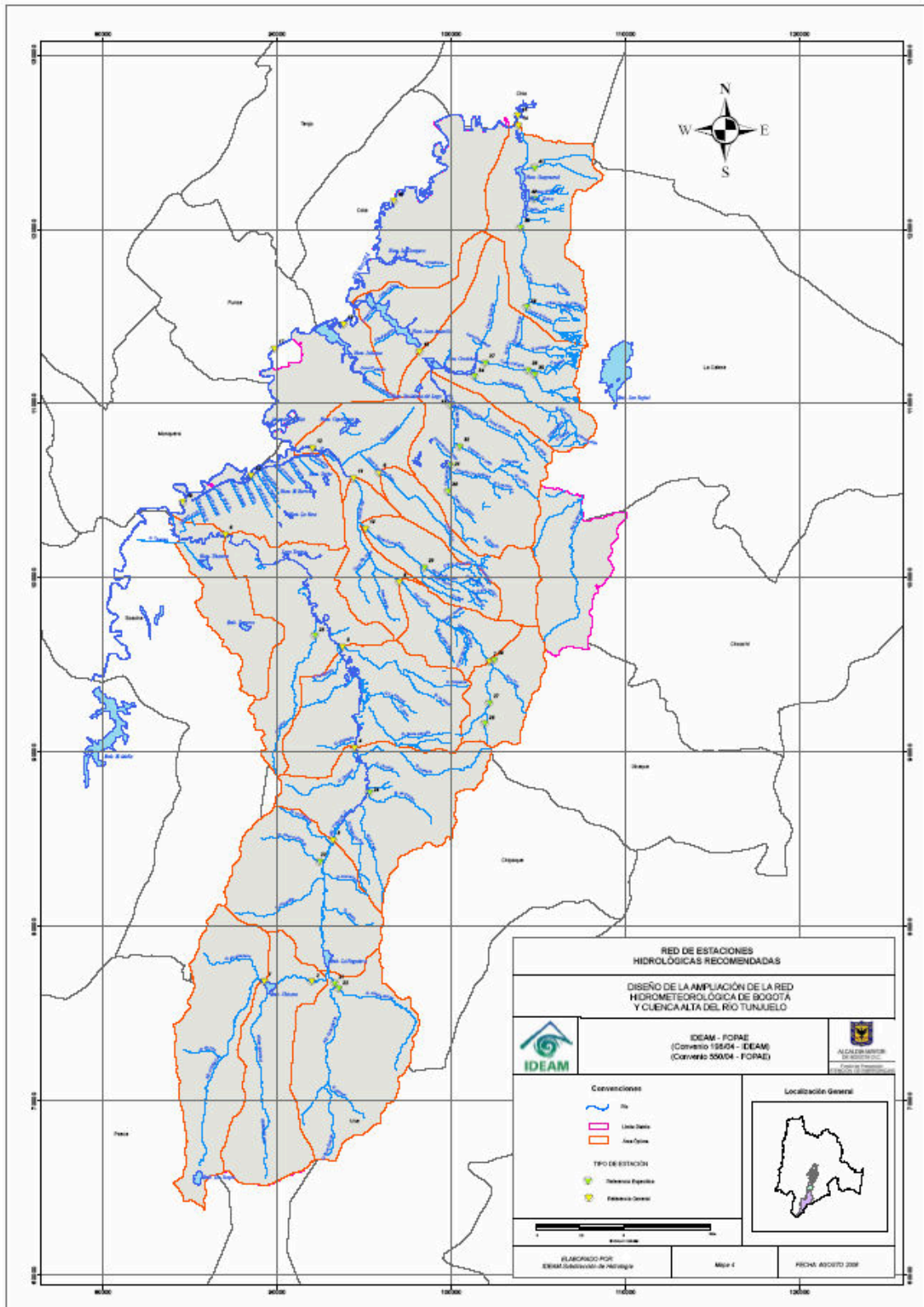
El número total de estaciones que arrojó el rediseño para el Distrito Capital es 42, a las que se suman las que se implementen en corrientes pequeñas de interés prioritario, cuyo valor se estima como un porcentaje de la suma del número de estaciones de referencia general y específico. Dicho porcentaje varía entre 15 y 30%. De tal modo que el número de estaciones para corrientes de interés prioritario oscila entre 6 y 11 para el caso de Bogotá, cuyo valor dependerá de las necesidades de la entidad operadora.

Ahora bien, la distribución espacial de las estaciones de referencia general se define a partir del área o longitud óptima estimada. Para el caso de las estaciones de referencia específica, se definen de acuerdo al número de orden de las subcuencas que aportan un caudal mayor o igual al error de medición. Mientras que para las estaciones localizadas en corriente de interés prioritario, se definen de acuerdo a los requerimientos de FOPAE; un punto de partida son las corrientes pequeñas que regularmente son afectadas por eventos de inundación y son de interés para el FOPAE¹².

De acuerdo con los parámetros de localización antes mencionados se ubicaron las estaciones en un mapa junto con las estaciones existentes, de modo que se pudo confrontar la localización de las estaciones de referencia general, las de referencia específica y las estaciones existentes, encontrándose un punto redundante el cual fue obviado, por lo que se redujo el total de estaciones a 41. Como resultado se obtuvo

¹² Basado en el Mapa de Inundaciones elaborado para el informe de “Compilación y Análisis de Información”

la Red Hidrológica que se aprecia en el



Mapa 4. La descripción en cuanto a: tipo de la red, la cuenca a la que esta asociada, la corriente sobre la cual esta localizado el punto, la descripción de la localización y el nombre de las estaciones existentes sobre el mismo punto se resume en la Tabla 31, a continuación.

Tabla 31. Descripción de la Red óptima de estaciones hidrológicas

Estación No.	Tipo de Red	Cuenca	Corriente	Descripción de la localización	Estación Existente en el punto propuesto
1	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Chisacá	A la entrada del Embalse Chisacá.	
2	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Tunjuelo	Aguas arriba de la desembocadura del río Curubital.	El Palmar (EAAB)
3	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Tunjuelo	Aguas abajo de la desembocadura de la Q. La Orqueta.	
4	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Tunjuelo	Aguas arriba de la desembocadura de la Q. El Botello	La Fiscala (EAAB)
5	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Tunjuelo	Aguas abajo de la desembocadura de la Q. Chiguaza.	San Benito (FOPAE)
6	Referencia General	Río Tunjuelo	Río Tunjuelo	Donde se encuentra la Estación Independencia operada por el FOPAE	Independencia (FOPAE)
7	Referencia General	Río Fucha	Río San Cristóbal	Localizada a unos 5400 m del nacimiento del río San Cristóbal	Cerca de El Delirio (EAAB)
8	Referencia General	Río Fucha	Río San Cristóbal	Localizada a 1200 m aguas arriba de la desembocadura del Canal Albina.	
9	Referencia General	Río Fucha	Canal San Francisco	Localizada a 1800 m aguas arriba de su descarga al canal Boyacá.	
10	Referencia General	Río Fucha	Canal Comuneros	Aguas arriba de la descarga.	Desc. Comun. (DAMA)
11	Referencia General	Río Fucha	Río Fucha	Donde se encuentra la Estación Visión Colombia	Visión Colombia (DAMA)
12	Referencia General	Río Fucha	Río Fucha	Cerca de la descarga del río Fucha al Bogotá	Fontibón (EAAB)
13	Referencia General	Río Juan Amarillo	Río Juan Amarillo	Donde se encuentra la Estación Tv. 91 operada por el DAMA, entre el Humedal Córdoba y Juan Amarillo	Transv. 91 (DAMA)
14	Referencia General	Humedal Guaymaral	Canal Guaymaral	Antes de descargar al Río Bogotá	
15	Referencia General	Río Bogotá	Río Bogotá	Aguas arriba de la desembocadura del Canal Guaymaral	
16	Referencia General	Río Bogotá	Río Bogotá	2700 m aguas abajo de la estación Puente La Virgen operada por la EAAB	
17	Referencia General	Río Bogotá	Río Bogotá	2900 m aguas arriba de la Estación de Puente Cundinamarca	EAAB CAR
18	Referencia General	Río Bogotá	Río Bogotá	Aguas arriba de la desembocadura del río Bogotá, aledaño a la estación La Isla de la EAAB	La Isla (EAAB)
19	Referencia General	Humedal Jaboque	Canal Jaboque	Antes de descargar al río Bogotá	Canal Jaboque (DAMA)
20	Referencia General	Canal Cundinamarca	Canal Cundinamarca	Antes de descargar al río Bogotá	
21	Referencia Especifica	Tunjuelo	Río Curubital	Aguas abajo de la confluencia del Q. Piedra Gorda y río Curubital	Pte. Australia (EAAB)
22	Referencia Especifica	Tunjuelo	Q. Piedra Gorda	Antes de desembocar al río Curubital	
23	Referencia Especifica	Tunjuelo	Q. Paso Colorado	Antes de desembocar al río Tunjuelo	
24	Referencia Especifica	Tunjuelo	Q. Fucha	Antes de desembocar al río Tunjuelo	
25	Referencia Especifica	Tunjuelo	Q. Limas	Antes de desembocar al río Tunjuelo	Candelaria (FOPAE)
26	Referencia Especifica	Río Fucha	R. San Cristóbal	Sobre afluente del río San Cristóbal, a unos 1200 m de su nacimiento	
27	Referencia Especifica	Río Fucha	R. San Cristóbal	Sobre el río San Cristóbal, a unos 2900 m de su nacimiento.	
28	Referencia Especifica	Río Fucha	R. San Cristóbal	Sobre un afluente que drena por el costado derecho del río San Cristóbal a unos 400m de la estación el Delirio del EAAB	

Tabla 31. Descripción de la Red óptima de estaciones hidrológicas

Estación No.	Tipo de Red	Cuenca	Corriente	Descripción de la localización	Estación Existente en el punto propuesto
29	Referencia Especifica	Río Fucha	R. San Agustín	Aguas arriba de la confluencia con la Q. Lajas.	
30	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal Arzobispo	100 m aguas abajo de la confluencia de la Q. Choachi y el Canal Arzobispo	
31	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Q. Los Olivos	Aguas abajo del colector Las Delicias	
32	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Q. La Vieja	Antes de la descarga	
33	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal R. Negro - Virrey	Antes de la descarga	Av. 68 (DAMA)
34	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal Los Molinos	Antes de la descarga	
35	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal Callejas	Aguas arriba de la confluencia con la Q. Trujillo	
36	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal Callejas	Aguas abajo de la confluencia con la Q. Trujillo	
37	Referencia Especifica	Río Juan Amarillo	Canal Callejas	Aguas abajo de la confluencia con la Q. Contador	
38	Referencia Especifica	Humedal Guaymaral	Canal El Cedro	Aguas arriba de la confluencia con la Q. San Cristóbal	
39	Referencia Especifica	Humedal Guaymaral	Canal Torca	Donde se encuentra la Estación Canal Torca operada por el DAMA, aguas arriba del Humedal Torca	Canal Torca (DAMA)
40	Referencia Especifica	Humedal Guaymaral	Q. San Juan	Antes de la descarga	
41	Referencia Especifica	Humedal Guaymaral	Afluente sin nombre	Antes de la descarga	

De los puntos de monitoreo propuestos 15 ya cuentan con estaciones hidrométricas, cuyos nombres y entidades que los operan se pueden ver en la Tabla 31. En el Mapa 5, también se encuentran resaltados como puntos de la red óptima que cuentan con estaciones hidrométricas.

Se debe tener en cuenta que la localización definitiva de las estaciones debe validarse mediante visitas de campo que permitan verificar la factibilidad e importancia del punto de monitoreo. En especial para la red de estaciones de referencia específica, ya que el diseño de esta red está sujeto a la veracidad y al nivel de detalle de la hidrografía al que se tiene acceso. Para el caso, variaba su nivel de detalle de mayor a menor en el siguiente orden: los cerros orientales, la cuenca del río Tunjuelo y finalmente la zona urbana del Distrito Capital.

Las estaciones de referencia general que se proponen componen la red mínima que demanda el Distrito Capital para el seguimiento de eventos significativos de inundación y que requieren de telemetría. Mientras que la de referencia específica y la de las corrientes prioritarias contribuyen a aumentar el nivel de detalle de monitoreo, por tanto dependerá de la entidad operadora determinar su importancia.

Se sugiere que la implementación de la red mínima se haga por cuencas (Bogotá, Tunjuelo, Fucha, Juan Amarillo y el sistema Torca – Guaymaral). Es decir, que al tener el cubrimiento mínimo en una cuenca se continúe con otra, de tal modo que se pueda hacer el seguimiento de paso de las crecientes a lo largo de la corriente instrumentada.

La implementación se propone realizar en dos etapas, la primera con la cuenca del Tunjuelo y río Bogotá, considerando que son los que han presentado mayor recurrencia de eventos de inundación y que en la actualidad cuentan con una red de estaciones telemétricas. La segunda etapa comprenderá las otras cuencas: Fucha, Juan Amarillo y el sistema Torca – Guaymaral.

Vale la pena aclarar que el orden propuesto es solo sugerencia, por tanto está sujeto a los cambios pertinentes dados por la entidad operadora (FOPAE) conforme a sus prioridades.

2.5 Influencia de la precipitación en los valores del caudal

La precipitación registrada en estaciones climatológicas localizadas dentro de una cuenca hidrológica no siempre es el camino más fácil para el pronóstico de caudales a la salida de dicha cuenca. Esto se hace más evidente en cuencas pequeñas (las cuales son más vulnerables a anomalías hidrológicas) y las originadas por la presencia de estructuras hidráulicas que transforman el régimen natural en uno controlado.

Dado que estas condiciones son propias de área de estudio, se hizo un análisis de la dependencia de la precipitación diaria y los valores de caudal. Para tal fin se calculó la matriz de correlación cruzada entre los valores diarios de precipitación (P) y los valores diarios de caudal (Q) entre cada una de las estaciones, para los siguientes casos:

- El caudal del día t (Q_t) y la precipitación del día t (P_t). Los resultados obtenidos se encuentran en el Mapa 12 del Anexo 1.
- El caudal del día t (Q_t) y la precipitación del día $t - 1$ (P_{t-1})
- El caudal (Q_t) y la precipitación acumulada de los 4 días anteriores ($P_{4\text{días}} = P_{t-4} + P_{t-3} + P_{t-2} + P_{t-1}$)

Con el fin de encontrar el grado de dependencia los valores precipitación con respecto a los de caudal se calcularon las funciones de regresión multivariada entre los valores de caudal y precipitación para:

- a. $Q_t = f(P1_t, P2_t, P3_t, \dots, Pn_t)$; n = identificación de la estación
- b. $Q_t = f(P1_{t-1}, P2_{t-1}, P3_{t-1}, \dots, Pn_{t-1})$; n = identificación de la estación
- c. $Q_t = f(P1_{4\text{días}}, P2_{4\text{días}}, P3_{4\text{días}}, \dots, Pn_{4\text{días}})$; n = identificación de la estación

Se descartaron las estaciones de precipitación que tuvieran un coeficiente de correlación con respecto a los valores de caudal menor a 0.4.

De los análisis realizados se puede observar que las correlaciones se incrementan hasta 3 veces en la función del numeral c con respecto a las funciones de los numerales a y b, alcanzando coeficientes de correlación de hasta del 70%. Los resultados obtenidos para el caso c se observan en Mapa 3.

3. ANÁLISIS, DIAGNÓSTICOS Y REDISEÑO DE LA RED METEOROLÓGICA ACTUAL

3.1 Generalidades

Tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM), una red meteorológica, “Es el conjunto de estaciones, convenientemente distribuidas, en las que se observan, miden y/o registran las diferentes variables, fenómenos y elementos atmosféricos que son necesarios en el conocimiento y determinación del estado del tiempo o del clima de una región, para su posterior aplicación en diversos usos y objetivos”.

Vale la pena aclarar que el orden propuesto es solo sugerencia, por tanto está sujeto a los cambios pertinentes dados por la entidad operadora (FOPAE) conforme a sus prioridades.

2.5 Influencia de la precipitación en los valores del caudal

La precipitación registrada en estaciones climatológicas localizadas dentro de una cuenca hidrológica no siempre es el camino más fácil para el pronóstico de caudales a la salida de dicha cuenca. Esto se hace más evidente en cuencas pequeñas (las cuales son más vulnerables a anomalías hidrológicas) y las originadas por la presencia de estructuras hidráulicas que transforman el régimen natural en uno controlado.

Dado que estas condiciones son propias de área de estudio, se hizo un análisis de la dependencia de la precipitación diaria y los valores de caudal. Para tal fin se calculó la matriz de correlación cruzada entre los valores diarios de precipitación (P) y los valores diarios de caudal (Q) entre cada una de las estaciones, para los siguientes casos:

- El caudal del día t (Q_t) y la precipitación del día t (P_t). Los resultados obtenidos se encuentran en el Mapa 12 del Anexo 1.
- El caudal del día t (Q_t) y la precipitación del día $t - 1$ (P_{t-1})
- El caudal (Q_t) y la precipitación acumulada de los 4 día anteriores ($P_{4\text{días}} = P_{t-4} + P_{t-3} + P_{t-2} + P_{t-1}$)

Con el fin de encontrar el grado de dependencia los valores precipitación con respecto a los de caudal se calcularon las funciones de regresión multivariada entre los valores de caudal y precipitación para:

- a. $Q_t = f(P1_t, P2_t, P3_t, \dots, Pn_t)$; n = identificación de la estación
- b. $Q_t = f(P1_{t-1}, P2_{t-1}, P3_{t-1}, \dots, Pn_{t-1})$; n = identificación de la estación
- c. $Q_t = f(P1_{4\text{días}}, P2_{4\text{días}}, P3_{4\text{días}}, \dots, Pn_{4\text{días}})$; n = identificación de la estación

Se descartaron las estaciones de precipitación que tuvieran un coeficiente de correlación con respecto a los valores de caudal menor a 0.4.

De los análisis realizados se puede observar que las correlaciones se incrementan hasta 3 veces en la función del numeral c con respecto a las funciones de los numerales a y b, alcanzando coeficientes de correlación de hasta del 70%. Los resultados obtenidos para el caso c se observan en Mapa 3.

3. ANÁLISIS, DIAGNÓSTICOS Y REDISEÑO DE LA RED METEOROLÓGICA ACTUAL

3.1 Generalidades

Tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM), una red meteorológica, “Es el conjunto de estaciones, convenientemente distribuidas, en las que se observan, miden y/o registran las diferentes variables, fenómenos y elementos atmosféricos que son necesarios en el conocimiento y determinación del estado del tiempo o del clima de una región, para su posterior aplicación en diversos usos y objetivos”.



Basados en el anterior concepto, se considera de una gran responsabilidad el disponer y conformar una red de este tipo, para cualquier entidad que se comprometa a la obtención de información meteorológica en una zona, región o país. Además, es relevante la obtención de información debidamente ordenada y controlada, a fin de proporcionar resultados que permitan confiar plenamente en los diversos análisis y adelantar estudios e investigaciones con fines meteorológicos, climatológicos y ambientales.

Es conveniente referir algunos hechos fundamentales en materia de meteorología que se han sucedido en Colombia.

En épocas del Virreinato, Santa Fe de Bogotá estuvo como pionera en materia y estudios meteorológicos en América del Sur. Una de las primeras referencias corresponde a lo realizado por don José Celestino Mutis a su llegada a estas tierras por el año de 1772. Luego se desarrollaron sucesos por parte de personas que intervinieron en el aspecto meteorológico entre otros el sabio Francisco José de Caldas como primer director del Observatorio Astronómico de la Real Expedición Botánica de Santa Fe de Bogotá en el año de 1805.

Posteriormente continuaron varios personajes dedicados al seguimiento de observaciones meteorológicas, como el caso del padre Simón Sarasola director del Observatorio Astronómico y el cual crea la Sección de Meteorología, en 1923.

Después por los años de 1941-1958, algunas entidades comienzan a tener programas de observaciones meteorológicas para proyectos específicos, como fueron el Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la Corporación Autónoma Regional (CAR), la Empresa Colombiana de Aeródromos (ECA, actualmente AEROCIVIL), el Instituto de Fomento Algodonero (IFA), Ferrocarriles Nacionales de Colombia (FNC) y el Instituto de Aprovechamiento de Aguas y Fomento Eléctrico (Electraguas), entre otras.

Entre 1958-1968, sumándose a las anteriores, aparecen otras entidades como el Instituto Colombiano de Reforma Agraria (INCORA), el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), y la Corporación Autónoma y Regional del Valle del Cauca (CVC), en esta época las actividades meteorológicas y climatológicas son orientadas principalmente por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En 1962, Colombia es oficialmente admitida como miembro de la OMM; por el año de 1968 se crea el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH) y una misión técnica de la OMM presta la asesoría para la organización de la entidad y se fundamenta la red básica en Colombia, bajo normas y métodos internacionales.

La observación y medición de elementos y fenómenos meteorológicos, estaba hasta el año de 1968, en entidades que requerían esta información para fines específicos tales como: EAAB, CAR, ECA, ELECTRAGUAS, INCORA, ICA, CVC, Instituto de Fomento Industrial (IFI), Instituto de Mercadeo Agropecuario (IDEMA), Federación Nacional de cafeteros de Colombia (FEDECAFE), Banco de la República, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Obras Públicas y otras.

Por lo tanto, la distribución de la red meteorológica, dependía entonces de proyectos específicos de acuerdo con las necesidades y objetivos de cada entidad. Esta situación por ende, daba lugar a diferentes normas de instalación, operación, instrumental, toma de observaciones, cálculo de las variables, etc., lo cual contribuía al desorden y obtención de la información en forma heterogénea, disparidad de criterios, discontinuidad y duplicidad, no sólo de información sino de esfuerzos humanos y económicos.

Consecuencia de lo anterior, no existía homogeneidad, ni comparativos a nivel nacional y regional, se observaban agrupaciones de estaciones en un mismo sitio con una gran densidad, instaladas con los mismos fines, entre tanto en otras zonas de importancia socio-económica y desarrollo, no se obtenía ningún tipo de información, dando un contraste bastante significativo.

Es así que a partir del año 1968, se dio una etapa crucial y definitiva con la creación del SCMH, dado que se comenzó la planificación técnica y se estableció la Red Meteorológica Nacional, agrupándose todas las estaciones de las diferentes redes institucionales que existían conformado así, una organización compleja con proyección meteorológica a nivel nacional e internacional.

Lo anterior fue un avance significativo, dado que se fortalecían los vínculos entre instituciones al igual que se definían y unificaban normas, sistemas, procedimientos operativos y técnicas en general sobre la información meteorológica en Colombia, por lo tanto se obtendrían la igualdad de conceptos de observación y control, acercándose mucho más a la realidad del dato y su origen en las diferentes variables meteorológicas.

3.2 Descripción de algunos métodos para diseño y optimización de redes meteorológicas

Dentro del ciclo hidrológico la precipitación y el caudal son los parámetros básicos a ser monitoreados en una cuenca y cuyos registros son útiles para el desarrollo de estudios de proyecto hidráulicos. La precipitación es normalmente el elemento más variable de modo que la mayoría de los métodos teóricos, usa como criterio la teoría de los errores de estimación de la variable que se muestra en la referencia con la variación del número de observaciones en el tiempo y en el espacio.

Algunos de los métodos de optimización de redes pluviométricas creados en el siglo XX han sido propuestos en Rusia, Estados Unidos, Polonia, Rumania, Canadá y Francia por diversos autores, los cuales han marcado una continua evolución en lo referente a la optimización de redes. En la Tabla 32 se indican algunos de los autores y los años en que se plantearon sus metodologías, algunas de éstas serán posteriormente descritas en forma breve.

Tabla 32. Algunos Métodos de optimización de la red Meteorológica¹³

No.	PAÍS	AUTOR	AÑO
1	URSS	Romanovskii V.	1925
2	URSS	Tomashievich P.	1933
3	URSS	Rubinstein E.	1936
4	URSS	Drozdov O.	1936
5	URSS	Drozdov O., Shepelievskii A.	1946
6	URSS	Gandin L.S.	1957
7	URSS	Ganding L.S.	1959
8	USA	Eagleson P.S.	1965
9	Polonia	Chomiz K	1965
10	Rumania	Diaconu C.	1965
11	USA	Eagleson P.S.	1967
12	Canadá	Solomon S. I.	1968
13	Francia	Delhome J-P	1973
14	USA	Rodríguez- Iturbe I., Mejía J.	1974

¹³ RIVERA H, "El Monitoreo ambiental en la República de Colombia con énfasis en hidrología", Pág. 27, 1999

3.2.1 Método de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)

La OMM ha tratado de estandarizar la densidad de estaciones hidrometeorológicas en un número mínimo deseable de acuerdo a las características de la región de estudio. Dichos criterios expresan el consenso de expertos sobre la materia y supeditan la densidad mínima a las características físicas y demográficas.

De esta manera, la OMM adentra el concepto de la red mínima la cual se define como aquella que proveerá la estructura de expansión para atender las necesidades de información para los usos específicos del agua. Esta red mínima tiene asociada una densidad mínima, que para el caso de la red climatológica se encuentra clasificada de acuerdo a los tipos de datos que son recopilados en una estación climatológica en la red básica, como son: precipitación y evaporación.

3.2.1.1 *Estaciones pluviométricas*

La densidad mínima de estaciones pluviométricas figura en la Tabla 33; se debe tener en cuenta que siguen ciertos principios de instalación y uso, el pequeño número de estaciones en la red mínima puede atender la mayoría de las necesidades más inmediatas.

Tabla 33. Densidad mínima recomendada de estaciones pluviométricas¹⁴

<i>Unidad fisiográfica</i>	<i>Densidades mínimas por estación (superficie en km² por estación)</i>	
	<i>Sin registro</i>	<i>Con registro</i>
Zonas costeras	900	9 000
Zonas montañosas	250	2 500
Llanuras interiores	575	5 750
Zonas escarpadas/ondulantes	575	5 750
Pequeñas islas	25	250
Zonas urbanas		10 a 20
Zonas polares y áridas	10 000	100 000

En general, los pluviómetros deberían estar tan uniformemente distribuidos como sea posible, teniendo en cuenta las necesidades prácticas de la información y la ubicación de los observadores voluntarios. En regiones montañosas, la atención debe darse a la zonalidad vertical utilizando aforos de almacenamiento para medir las precipitaciones en grandes altitudes.

La red mínima debería consistir en tres clases de pluviómetros:

- a) Pluviómetros ordinarios: son aparatos que realizan lecturas diarias de cantidad. Además de la cantidad diaria de precipitación, en cada una de estas situaciones se efectuarán las observaciones del estado del tiempo;
- b) pluviómetros registradores: en estaciones que todavía no se han establecido y en clima frío, es aconsejable tener al menos 10 por ciento de pluviómetros registradores. La mayor densidad de estaciones de registro deberían lograrse en zonas donde se producen lluvias intensas, de corta duración. Estas estaciones proveerán información valiosa de la intensidad, distribución y duración de

¹⁴ Fuente: OMM, "Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones, OMM – No. 168.1994

las precipitaciones. Para zonas urbanas, donde la resolución del tiempo necesario para las mediciones de precipitación es de uno a dos minutos, la atención especial debería centrarse en la sincronización de tiempo de los pluviómetros. Para mediciones fiables, se recomienda el pluviógrafo de balancín con memoria electrónica (u otro medio de lectura informática). Para la instalación de pluviómetros registradores debería darse prioridad, a las siguientes zonas: zonas urbanas (población de más de 10.000 habitantes) donde se van a construir sistemas de drenaje extensivos, cuencas hidrográficas donde se prevén o están en funcionamiento sistemas principales de control de ríos, grandes zonas inadecuadamente cubiertas por la red existente y en proyectos especiales de investigación;

- c) pluviómetros totalizadores: se pueden instalar en regiones poco habitadas o aisladas, como en terreno desierto o montañoso. Los pluviómetros totalizadores se leen mensualmente, estacionalmente o siempre que sea posible inspeccionar las estaciones.

La coordinación de las ubicaciones de los pluviómetros con respecto a las estaciones de aforos de caudal es de gran importancia, con el fin de garantizar que la información pluviométrica complete los registros de flujos fluviales (para la predicción de inundaciones o el análisis hidrológico). Los pluviómetros deberán estar localizados de modo que la precipitación en la cuenca pueda estimarse por cada estación de aforo de caudal.

3.2.1.2 Estaciones de evaporación

La densidad recomendada para una red mínima de estaciones de evaporación, en zonas de fisiografía uniforme, se indican en la Tabla 34.

Tabla 34. Densidad mínima de estaciones de evaporación¹⁵

<i>Unidad fisiográfica</i>	<i>Densidad mínima por estación (Superficie en km² por estación)</i>
Zonas costeras	50 000
Zonas montañosas	50 000
Llanuras interiores	50 000
Zonas escarpadas/ondulantes	50 000
Pequeñas islas	50 000
Zonas polares y áridas	100 000

La evaporación desempeña un papel importante en estudios a largo plazo del régimen acuático de lagos y embalses así como en la explotación de los recursos hídricos. En dichos casos, el número y la distribución de estaciones de evaporación están determinados con base al área y a la configuración de los lagos y de la región o regiones climáticas en que se encuentran.

3.2.2 Método de Correlación Espacial – Kagan

La base del método de KAGAN lo constituye la función de correlación $\rho(d)$, la cual viene a ser dependiente del espaciamiento entre estaciones y su forma depende de las características del área en consideración y del tipo de precipitación. Que puede ser expresado matemáticamente de la siguiente manera.

¹⁵ Fuente: OMM, "Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones, OMM – No. 168.1994

$$\rho(d) = \rho(o) \cdot e^{-\frac{d}{d_o}} \quad (1)$$

Donde d – Distancia entre estaciones
 $\rho(o)$ – Coeficiente de correlación cruzada para una distancia $d=0$
 d_o – Radio de correlación, o distancia a la cual el coeficiente es $\rho(o)/e$

Teóricamente $\rho(o)$ debería ser igual a la unidad; sin embargo, es menor debido a los errores aleatorios en la medición de la precipitación y a la diferencia microclimática que podría presentarse en el área de estudio. KAGAN (1966) estima la varianza de dichos errores de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma_1^2 = [1 - \rho(o)] \cdot \sigma_p^2 \quad (2)$$

Donde σ_p^2 – Varianza de la precipitación puntual

Los parámetros $\rho(o)$ y d_o los usa KAGAN para determinar la bondad de la red meteorológica siguiendo los dos criterios siguientes:

3.2.2.1 Evaluación de la predicción de la lluvia promedio

La varianza del error de predicción media sobre un área unitaria, “a”, con una estación central se define como la suma del error de medición dado y la variación espacial. De tal modo, que la varianza para el área total “A” con “n” estaciones uniformemente distribuidas esta dada por la siguiente expresión:

$$Vn = \frac{\sigma_p^2}{n} \left[1 - \rho(o) + \frac{0.23}{d_o} \cdot \frac{\sqrt{A}}{n} \right] \quad (3)$$

El error cuadrático medio relativo (Z_1) es entonces:

$$Z_1 = \frac{\sqrt{Vn}}{\bar{P}} = Cv \cdot \sqrt{\frac{1 - \rho(o) + \frac{0.23}{d_o} \cdot \frac{\sqrt{A}}{n}}{n}} \quad (4)$$

Donde Cv – $\frac{\sigma_p^2}{\bar{P}}$
 \bar{P} – Precipitación media sobre el área A

Conocido $\rho(o)$ y d_o , la ecuación (4) proporciona el valor de n (número de estaciones) para un error (Z_1) fijo y viceversa.

Si se adopta una distribución cuadrangular, el espaciamiento entre estaciones será:

$$L = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (5)$$

Donde L – Espaciamiento entre estaciones

Pero, cuando el área posee una configuración compleja se recomienda que la distribución sea triangular, de modo que el espaciamiento esta dado por:

$$L = 1.07 \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (6)$$

3.2.2.2 Evaluación de la predicción de la interpolación espacial

El error relativo asociado con una interpolación lineal entre dos puntos e interpolación hacia el centro de un cuadrángulo o triángulo, donde ocurre el máximo error es dado por KAGAN (WMO, 1972) para una distribución triangular por la siguiente expresión:

$$Z_3 = Cv \cdot \sqrt{\frac{1}{3} [1 - \rho(o)] + 0.52 \cdot \frac{\rho(o)}{d_o} \frac{\sqrt{A}}{n}} \quad (4)$$

Donde $Cv = \frac{\sigma_p^2}{\bar{P}}$

La evaluación de Z_1 y Z_3 requieren del conocimiento de $\rho(o)$ y d_o , los cuales pueden ser evaluados de la función $\rho(d)$ deducida de los datos observados. Además, al aplicar el método se debe tener en cuenta que el valor de precisión Z máximo a considerar es del 10%. Sin embargo, esto constituye en un procedimiento arbitrario, por lo que también es razonable el análisis de un descenso no significativo del valor de Z con el incremento del número de estaciones, aunque este se encuentre por arriba del 10%.

3.2.3 Otros métodos

Otros métodos creados para la optimización de redes pluviométricas se indican de manera breve en la Tabla 35, donde se señalan las expresiones matemáticas en que se fundamentan junto con la descripción de los parámetros que las conforman.

Tabla 35. Breve descripción de las expresiones matemáticas de los métodos de optimización¹⁶

No	Algunas expresiones matemáticas	Descripción de parámetros
	Δ_i	Δ_i – Error de interpolación lineal del valor de la variable meteorológica utilizando diferentes grupos de estaciones, ubicadas sobre una recta en distancias de 100, 50, 35, 20 y 10 Km.
	σ	n – Desviación promedio cuadrático del error de interpolación
2	D_3	L – Decilio tercero superior

¹⁶ RIVERA H, "El Monitoreo ambiental en la República de Colombia con énfasis en hidrología", Pág. 49, 1999

Tabla 35. Breve descripción de las expresiones matemáticas de los métodos de optimización¹⁶

No	Algunas expresiones matemáticas	Descripción de parámetros
	$H_B = \sum (H_i + H_{i+1}) F_{i,i+1} / 2F ;$ $H_B = \Delta H \sum (l_i + l_{i+1}) F_{i,i+1} / 2F ;$	<p>H_B – Altitud media en las pendientes IB; I_B – pendiente media de la cuenca (centro de gravedad); H_i – altitud de la isoyeta; H_{i+1} – altitud de la isoyeta i+1;</p>
10	$Cv = \frac{9}{\sqrt{H_B}} ;$ $Cv = f(Y, Cv, Y/q_v)$	<p>F_{i, i+1} – área entre la isoyeta y el límite de la cuenca; l_i + l_{i+1} – longitud entre la isoyeta y el límite de la cuenca; Cv – Coeficiente de variación de la escorrentía; C_{vv} – Coeficiente de variación de la escorrentía mínima; Y – Escorrentía (caudal); q_v – lámina de agua</p>

Para el efecto del diseño en las redes meteorológicas, los métodos de optimización han sido desarrollados principalmente en Rusia, Estados Unidos, Polonia, Rumania, Canadá y Francia, desde 1925 hasta los últimos en 1974.

3.3 Modelo conceptual para el diseño de la red meteorológica

3.3.1 Fundamentos de la red meteorológica óptima

La utilización de una red meteorológica podemos determinarla para dos facetas:

- Fuente de Información Básica, necesaria para el normal desarrollo económico, social y científico en un país.
- Fines Nacionales e Internacionales, dado que proporcionan información a nivel nacional, regional e internacional, la cual es fundamental y apropiada para el estudio de variables y fenómenos atmosféricos a una escala que traspasa las fronteras, análisis y estudios que una vez realizados, revierten sobre el propio país, lo que supone una gran ayuda substancial para los planes de desarrollo a todo nivel.

3.3.1.1 Importancia y clasificación

La red meteorológica es de gran importancia, dado que reviste un significativo sistema para conocer las diferentes regiones climáticas de las áreas con diferentes condiciones físico-geográficas en un país, región, zona, ciudad, etc. Igualmente contribuye para el conocimiento de las condiciones del Estado del Tiempo en todas sus fases: pasado, presente y futuro. Por lo tanto, para la aplicación y aspectos climatológicos es importante contar con dos tipos de redes: Climatológica y Pluviométrica.

Red Climatológica

Se compone de estaciones de varias categorías, las cuales deben dar completa información sobre los regimenes climáticos de las áreas con diferentes condiciones: valles, planicies, zonas montañosas, costeras, desérticas, urbanas, rurales, etc. En cada estación que integra esta red se realizan observaciones durante largos períodos para conocer la distribución más común y las características más frecuentes de los estados atmosféricos a través de los años, hasta alcanzar las normales climatológicas.

Red Pluviométrica

El conjunto de pluviómetros y pluviógrafos que conforman la red, dará la información necesaria para conocer el comportamiento, características y distribución de la precipitación de una región, tanto espacial como temporal, igualmente hasta lograr la determinación de la normal climatológica para esa localidad.

3.3.2 Criterios de Escalas de Representatividad

Los fenómenos meteorológicos no tienen todos las mismas dimensiones, existen diferencias significativas entre el tamaño de una tormenta de carácter local de tipo convectivo y las presentadas en cadena a lo largo de una línea de inestabilidad o un frente meteorológico.

De la misma manera, si contemplamos cualquier otra variable, temperatura, viento, precipitación, etc., vamos a encontrar cambios generados así sea en un entorno que se estima homogéneo, y más aun si las condiciones comienzan a tener comportamientos físico-geográficos diferentes, la variación de dichas variables va a ser mayor.

Por ello, al proyectar una red meteorológica, conviene tener en cuenta la magnitud de los fenómenos que se van a observar y medir, además la variabilidad climática de la zona, su aspecto y factores geográficos y orográficos, coberturas de vegetación, población, centros industriales, cuencas hidrográficas, etc. Lo anterior contempla entonces que se necesitan de ciertas escalas a saber:

- Micro fenómenos - Distancia en superficie hasta de 20 kilómetros.
- Meso fenómenos - Distancia en superficie entre 30 a 80 kilómetros.
- Macro fenómenos - Distancia en superficie hasta 150 kilómetros.

3.3.3 Criterios de Red Equilibrada

Una red equilibrada será aquella que estará en capacidad de detectar con suficiente precisión y consistencia, los fenómenos y variables meteorológicas en las diferentes escalas en una región considerada. Por tal motivo, debido a la variabilidad y ocurrencia especial de los distintos fenómenos, dicha red tendrá que ajustarse, de acuerdo con las exigencias y aplicaciones, a los proyectos o fines requeridos. La componente y tipo de estaciones de la red será entonces:

- Sinópticas Principales (A).
- Climatológicas Principales (B).
- Climatológicas Ordinarias (C).
- Pluviométricas (D).

Según y de acuerdo con las recomendaciones y normas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se establece la distancia entre dos estaciones y su radio de acción, teniendo en cuenta que no existe ninguna influencia orográfica, es decir terreno totalmente plano.

Tabla 36. Red Equilibrada

TIPO	DISTANCIA (Km)	RADIO DE ACCIÓN (Km)
Sinóptica Principal (A)	253	126
Climatológica Principal (B)	113	56

Climatológica Ordinaria (C)	51	25
Pluviométrica (D)	23	12

Sin embargo y dada la influencia del relieve sobre la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, la densidad de la red variará con la topografía del lugar. Es así que se adopta, para las regiones montañosas densidades por encima de 1.5 veces mayor que para el terreno plano o llano, dependiendo de los gradientes, tipos y sistemas físicos que afecten la región. Ver Figura 26.

El criterio para determinar si un terreno es montañoso, a fin de aplicar coeficientes de densidad, es variable de una región a otra, pero en primera aproximación se considera un terreno montañoso aquel cuya elevación sobrepasa de 200 metros.

Por ejemplo, la variación de la precipitación con la altitud consiste generalmente en un aumento de la variable, hasta alcanzar una altura – optimum pluvial- y a partir de ésta decrece.

El gradiente vertical de la pluviosidad y la altitud del optimum pluvial varían mucho, sin poder determinar una fórmula de aplicación general, en tanto, se recomienda para lograr determinar una curva hipsométrica de la precipitación, instalar estaciones a diferentes alturas; el intervalo de alturas sin cubrir no deberá pasar de 500 metros.

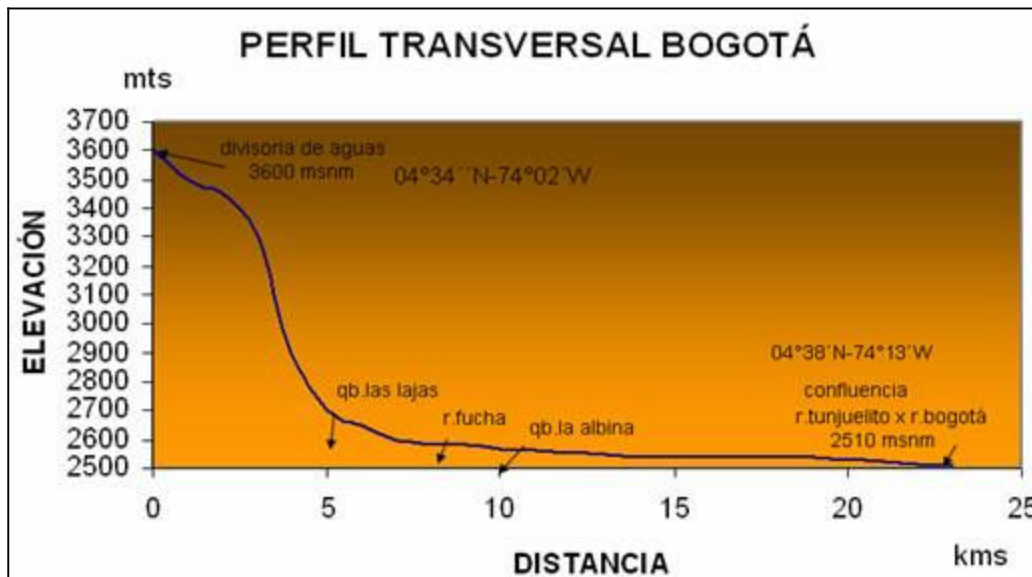


Figura 26. Perfil transversal Bogotá

Por lo tanto, es aconsejable y conveniente la instalación de puestos pluviométricos cerca de la divisoria de aguas, ya que este tipo de estaciones normalmente sirve y contribuye para otras cuencas. Igualmente es importante que las redes meteorológicas e hidrológicas se establezcan en forma integrada, especialmente la pluviométrica e hidrométrica.

Considerando lo anterior, en las cuencas o zonas donde existan o se prevean estudios hidrometeorológicos con vistas a construcciones de presas, será de vital importancia la instalación de estaciones climatológicas para tener puntos de referencia en que apoyar las correlaciones de lluvia, evaporación, radiación, viento y temperatura entre otras, para lograr un seguimiento y condiciones del comportamiento atmosférico y su incidencia en dicha región.

Igualmente en las zonas fuertemente pobladas, industrializadas o cultivadas que constituyen una realidad presente de revalorización, sectores urbanos, ambientes o reservas naturales, focos de contaminación, degradación de suelos y otra más del contexto físico ambiental, la necesidad de los datos meteorológicos es significativa, sobretodo los datos de precipitación, por el gran consumo de agua; por tanto; la densidad de la red pluviométrica deberá ser mayor y bien ajustada.

3.4 Diseño de ampliación de la red meteorológica para Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo

3.4.1 Red Meteorológica actual

De la misma forma en la que se refirió la historia de la meteorología en Colombia, igualmente se refleja en lo que concierne para el área de estudio de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo. El principal objetivo es dar a conocer una Caracterización del Clima, teniendo como base las estaciones meteorológicas localizadas a lo largo y ancho de la zona demarcada de estudio.

Se presenta un mapa de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo, como el área de localización donde se establecerá los diferentes análisis sobre comportamiento y variabilidades de los elementos y fenómenos atmosféricos incidentes en la región (Mapa 6).

Como se anotó anteriormente, existían varias entidades con su respectiva red, cuyo fin obedecía a satisfacer sus estudios o proyectos específicos, de acuerdo con las necesidades y aplicaciones para cada entidad, que a la postre fueron unificándose mediante la creación del SCMH hoy IDEAM. Sin embargo, actualmente existen en el área de Bogotá instituciones con red propia e independiente, entre otras: ACUEDUCTO, DAMA, FOPAE, CAR e IDEAM.

El ACUEDUCTO, con una operación local de la red, protege sus zonas y planifica todos sus sistemas dirigidos a garantizar el abastecimiento y operación del agua para la ciudad, así como la reserva y el manejo del recurso hídrico en el entorno de la capital.

Por otra parte el DAMA y FOPAE, con la operación de sus redes más localizadas, persiguen sus propósitos y fines, el primero con objetivos y planes en el manejo del saneamiento y control ambiental, y el segundo, en la prevención y atención de emergencias y desastres, a todo lo amplio de la ciudad de Bogotá, ambos de todos modos se concretan a fines específicos.

La CAR con su operatividad de red en una escala de carácter regional, para la administración, manejos y aprovechamiento de los recursos renovables también se clasifica confines específicos, al igual que el IDEAM como entidad rectora de la meteorología, acoge sus funciones y objetivos para el conocimiento general del estado del tiempo y el clima en general.

Se observa por lo tanto, que todos convergen en un mismo fin y es conocer aspectos del comportamiento meteorológico y del clima, así sea de una o más variables o fenómenos atmosféricos, que inciden de alguna forma o en conjunto con las funciones, propósitos o aplicaciones que persigue cada entidad.

3.4.2 Aplicación de los criterios de diseño

3.4.2.1 *Densidad de representación para la red en Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*

Con base a los análisis realizados de la red actual y teniendo en cuenta las recomendaciones expuestas, se recomienda un ajuste en 4 veces su densidad, por lo cual quedaría de la forma:

Tabla 37. Densidad de representatividad para el área de estudio

TIPO	DISTANCIA (Km)	RADIO DE ACCIÓN (Km)
Climatológica Ordinaria (C)	12	6
Pluviométrica (D)	6	3

3.4.2.2 *Mapas de redes meteorológicas actuales para entidades con influencia en el área de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*

El presente conjunto de mapas con la red de precipitación y climatológica para las entidades de: ACUEDUCTO, CAR, DAMA, FOPAE e IDEAM, pretende además de lograr una observación espacial de la ubicación de estaciones y su área de cobertura o envolvente, permitir y observar la situación de cada una de las redes y tomar conciencia de la importancia que se tiene con respecto a la toma de información, si realmente hay razones lógicas y técnicas de los emplazamientos actuales, si existen programas serios que van a dar aportes positivos tanto regional, nacional o internacional, si se están operando y realizando seguimientos del instrumental en forma debida y adecuada, y finalmente, si se está generando una información confiable y veraz para los diversos fines que persigue cada una de las entidades.

El conjunto de mapas se encuentra en el siguiente orden:

- Red de Precipitación para ACUEDUCTO, CAR, DAMA, FOPAE e IDEAM. (Ver Mapa 7 al Mapa 11).
- Red Climatológica en su mismo orden. (Ver Mapa 12 al Mapa 15)
- Envoltentes para la parte pluviométrica y climatológica para cada entidad. (Ver Mapa 16 al Mapa 24).
- Red del Proyecto GLOBE del IDEAM y comparaciones de esta red con respecto a la general del IDEAM. (Ver Mapa 25 al Mapa 27).
- Red Conjunta de Precipitación de las cinco entidades. Ver Mapa 28.
- Red Conjunta Climatológica de las cinco entidades. Ver Mapa 29.

De acuerdo a lo analizado se observa que:

- La red de ACUEDUCTO, aunque es la más densa en puestos de toma de información pluviométrica para el área en cuestión, se aprecian algunos vacíos en la parte media y alta hacia el sur. En lo pertinente con la red climatológica, aunque aparentemente al inventariar la clase y tipo de estaciones, se apreciaba en igual condiciones que la pluviométrica, las condiciones reales fueron otras, y aparece con una baja densidad con información puntual y muy apartada en la zona.
- La red de la CAR, se encuentra relativamente cubriendo en bajo porcentaje los sectores del norte y sur-occidente, mientras que los demás muestran una menor densidad.

- El DAMA, concentra su cobertura en el centro-norte, occidente y algo del sur, faltaría implementar norte y oriente y el sur hacia el sector de la parte alta del río Tunjuelo.
- La red de FOPAE, concentrada en particular en zonas del sur, parte media de río Tunjuelo y sur-oriente, sería conveniente complementar sectores por los cerros orientales y en la parte alta del río Tunjuelo; aunque los riesgos no son tan altos en el resto de la zona, valdría la pena analizar que otros tipos de emergencias podrían presentarse para ajustar algunos puestos especiales de observación, o en su defecto suplirse con información de otras instituciones.
- El IDEAM, aunque posee un relativo cubrimiento, necesita complementar la parte alta del río Tunjuelo y sectores del oriente. Además replantear la actual red y buscar ajustes con respecto a las estaciones del proyecto GLOBE, reubicaciones y otros aspectos a fin de optimizar la red existente.

3.4.3 Análisis y recomendaciones de reubicación de estaciones

Teniendo en cuenta los análisis y factores que afectan la configuración de las redes y con base a la recomendación en el Documento OMM, de Prácticas Hidrometeorológicas WMO. N° 168 TP.82. 3.1.5.” La red de estaciones debe revisarse cada pocos años de operación y, cuando sea necesario, se agregarán nuevas estaciones, se abandonarán o reubicarán otras para asegurar mayor representatividad y precisión en las medidas.”

Al respecto de lo anterior, es conveniente la revisión y ajuste de las redes sobre todo aquellas que se encuentran bajo la influencias de cambios, como es la parte urbana, donde día a día se observa el crecimiento de construcciones complejas, mayor área de vivienda, asentamientos humanos, vías y sistemas artificiales, dejando atrás y disminuyendo la parte natural, ecosistemas y hasta reservas naturales como es el caso de Bogotá con los Cerros Orientales y áreas verdes, donde se recomienda fortalecer la atención y planificación para la conservación del medio ambiente y la recuperación de los entornos naturales y del paisaje para la ciudad.

3.4.4 Expansión y ajuste de la red meteorológica

La expansión de las redes de estaciones meteorológicas, debe ser ajustada y extendida en función del tiempo hasta que las relaciones locales o regionales sean establecidas, lo que permitirá estimar características de la variable o fenómeno en áreas no observadas con un nivel de exactitud adecuado para el propósito que corresponda.

Por ello, se debe tener cuidado, no sólo en establecer sino también en atender la operatividad continua de las estaciones y ejercer el control en la confiabilidad y exactitud de los datos, registros e información en general.

Igualmente es conveniente establecer el seguimiento y evaluación de la red, mediante programas de correlación para evaluar la representatividad entre las diferentes estaciones que componen la red local o regional; con el objeto de establecer el grado de correlatividad entre las estaciones y si sus aproximaciones están siendo acordes para mostrar el desarrollo formal y confiabilidad de información meteorológica del sector o área.



De esta manera estaremos considerando que la red actual está cumpliendo con la cobertura deseada para el conocimiento del régimen y el seguimiento del comportamiento de variables, de lo contrario, tendríamos que pensar en ajustar distancias entre estaciones hasta lograr una optimización de representatividad.

Al respecto, el documento WMO –N° 265 TP 149 de L.S. Gandin NOTA TECNICA N° 111, establece grados de correlación y aceptabilidad entre las estaciones, tiempo de las series y áreas de representatividad; aunque no se estudia la zona tropical, sino únicamente las latitudes medias y altas, los resultados son válidos y ayudan a definir criterios para estas áreas, donde las condiciones de representatividad, son aún más difíciles de establecer, principalmente en sitios o regiones donde inciden la topografía, sistemas de convección regulares y donde los cambios de las condiciones meteorológicas son rápidos con ocurrencia de lluvias significativas y de carácter local.

Un criterio sencillo pero efectivo sobre el ajuste de la red mínima, son las variaciones de precipitación, precisamente se basa en el análisis espacial de mapas anuales que comprendan cierto número de años, como recomendado mayor a 20, que representen el comportamiento de la precipitación en determinada zona, a partir de dicho mapa se analizará donde existen vacíos o en donde es necesario complementar y ajustar estaciones que permitan una mejor ayuda y distribución en forma regular y continua de la precipitación.

El Documento Guía de Prácticas Hidrometeorológicas WMO- Diseño de Redes N°168-TP.82, numeral 3.2.11.2, se refiere a “Es conveniente anotar que debido a la expansión de áreas urbanas, se requieren redes cuya densidad estará en función de la variabilidad espacial de las lluvias sobre todo aquellas de corta duración”.

Por lo tanto y dadas estas referencias de apoyo, en las cuales están totalmente acordes con algunos criterios personales, se adelanta el ajuste de la red meteorológica para Bogotá, donde se realizan los análisis de mapas de lluvias que se elaboran dentro del marco del estudio de la Caracterización Climática para Bogotá, lo cual ayudará a conocer en detalle, dónde se requiere realizar ajustes de la densidad de estaciones meteorológicas tanto para los análisis de lluvia como de otras variables que se observen y así obtener una óptima representatividad del área de Bogotá.

3.4.5 Localización recomendada para ajuste de la red meteorológica

Con el objeto de suplir las deficiencias de coberturas en las diferentes redes que se enumeraron en el contexto, se hace necesario y conveniente, complementar algunos sectores en el área de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo, a fin de contribuir en una mejor distribución de la red de estaciones, conducente a la adquisición de información meteorológica, fundamental para aplicaciones ambientales, proyectos y fines específicos, al igual que su importancia en el desarrollo económico y el seguimiento de condiciones atmosféricas en la ciudad de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo.

Por ello y teniendo en cuenta las redes existentes de las instituciones descritas en el área de Bogotá, se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas en los siguientes sitios a fin de suplir las necesidades y ajustes básicos a nivel climático:

1. Zona Alta del río Tunjuelo, entre las cuencas de los ríos MUGROSO y CURUBITAL, por sobre cotas de 3400 a 3500 metros sobre el nivel del mar.
2. Sector comprendido entre los cerros de Monserrate y Guadalupe, cotas por los 3100 a 3300 metros.

3.4.6 Situación y estado de las estaciones de la red meteorológica actual

Una vez analizadas las diferentes situaciones en las redes meteorológicas existentes y complementando con la visita de reconocimiento de campo efectuada a cada estación para su correspondiente evaluación de levantamiento de datos, ubicación, confirmación de la localización física, obstáculos, elevación, disposición y estado de funcionamiento relativo al instrumental, toma de datos por parte de observadores, historial de la estación y la representación e importancia en la conformación de la red, al igual que su calidad y fiabilidad de la información, para un total aproximado de 140 puntos, donde se incluían estaciones en funcionamiento actual y suspendidas; se evaluaron dichos resultados, dando lugar y fundamento para establecer algunos comentarios y conceptos generales sobre la actual red meteorológica en el área de estudio (Ver Tabla 38 a la Tabla 43).

La red meteorológica existente del acueducto, es la que ofrece mayor densidad de estaciones y por lo tanto, da una mejor caracterización general de la zona, el mayor tipo de estaciones son medidoras de lluvia.

Tabla 38. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica de la EAAB

N°	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
1	BOCAGRANDE-SALITRE	PM	2120019	Q. Bocagrande	BUENO	Buena representatividad, cuenca alta de Q. Bocagrande.
2	BOSA-BARRENO N°2	PG	2120154	R. Tunjuelo	REGULAR	Localizada en sector urbano, 3° piso azotea de casa. Mejorar estado de estación.
3	CAMAVIEJA	CO	2120569	R. Bogotá	BUENO	Localizada en azotea edificio Acueducto. Buena representatividad.
4	CASA BOMBAS SALITRE	PG	2120196	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad. Confiable.
5	CASABLANCA	PM	2120197	R. Tunjuelo	BUENO	Localizada en tanques de la EAAB. Representatividad buena. Rectificar distancias de PG y PM, mejorar estación.
6	CERRO DE SUBA	PG	2120031	R. Juan Amarillo	BUENO	Representatividad regular, azotea de casa 3° piso. Se recomienda reubicación. Datos confiables. Cuenca Juan Amarillo.
7	EL CORTIJO	PM	2120067	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad para la zona, parte plana occidente de Bogotá, calle 80.
8	EL DELIRIO	PG	2120013	R. San Cristóbal	BUENO	Muy buena representatividad para la zona. Confiable.
9	EL GRANIZO	PG	2120032	R. Arzobispo	BUENO	Buena representatividad para la zona, cerro de Monserrate parte posterior.
10	EL HATO	PM	2120020	R. Chisacá	BUENO	Buena representatividad para la zona. Confiable.
11	EL VERJÓN	PG	2120024	R. Teusacá	BUENO	Buena representatividad para la zona. Confiable.
12	FONTIBÓN	PM	2120547	R. Fucha	BUENO	Aceptable representatividad, árboles al sur con ligera incidencia para datos de lluvia. Confiable. Cuenca R. Fucha.
13	GUADALUPE	PG	2120198	R. Bogotá	BUENO	Mejorar el parque de encerramiento y posibilidad de reubicación. Cuenca R. San Francisco.
14	JUAN REY	PG	2120204	R. Tunjuelo	BUENO	Piedemonte divisoria de aguas de la zona. Confiable. Corregir elevación. Existen 4 estaciones diferentes entidades
15	LA CARO	PM	2120531	R. Bogotá	BUENO	Confiable. Existen árboles al este y sureste que inciden datos de lluvia.
16	LA CONEJERA	PG	2120208	R. Bogotá	BUENO	Muy buena representatividad. Confiable.
17	LA REGADERA	ME	2120509	R. Tunjuelo	BUENO	Estación automática. No es representativa para la zona, solo para el sector de la represa. Cercanía a masa líquida.
18	LOS TUNJOS	PM	2120210	R. Chisacá	BUENO	Buena representatividad para la zona. Localizada Divisoria de Aguas, nacimiento río Chisacá. Confiable.
19	PLANTA ELDORADO	CO		R. Tunjuelo	BUENO	Estación automática. Buena representatividad para la zona. Escasa información.
20	PLANTA WIESNER	CO	2120642	R. Teusacá	BUENO	Buena representatividad, corrección de coordenadas y elevación. Emplazamiento cerca de cuerpos de agua.
21	QUIBA	PG	2120205	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. Mejorar parque encerramiento
22	SAN DIEGO	PG	2120023	R. Arzobispo	MALO	Mala representatividad, árboles en todos los 360°, incide para lluvias. No confiable.
23	SAN FRANCISCO-SALITRE K9	PG	2120008	R. San Francisco	BUENO	Buena representatividad en cerros orientales. Confiable. Ligero obstáculo al Este (árboles).

Tabla 38. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica de la EAAB

Nº	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
24	SAN LUIS	PG	2120040	R. Teusacá	BUENO	Representativa de la zona. Confiable. Corregir elevación. Localizada Q. La Vieja.
25	SAN RAFAEL	PG	2120011	R. Teusacá	BUENO	Automática, registros confiables.
26	SANTA LUCIA	PG	2120052	R. Fucha	BUENO	Representatividad buena. Ubicada en Tanque Acueducto.
27	SANTA ROSA-CARRET.	PG		R. Santa Rosa	BUENO	Buena representatividad. Ligera interferencia de árboles para datos de lluvia.
28	SAUCEDAL II	PM	2120207	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad de la zona. Mejorar estado físico de estación e instrumental.
29	SORATAMA	CO		R. Bogotá	MALO	Estación automática. Localizada en San Cristóbal Norte. Posibilidad de FOPAE operarla para optimizar red.
30	SERREZUELA	PG	2120202	R. Bogotá	BUENO	Confiable. Localizada en el área limítrofe - Cuencas ríos Teusacá y Bogotá. Representativa área Torca y norte Bogotá.
31	TANQUE JALISCO TUNAL	PG	2120059	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. Confiable.
32	USAQUÉN SANTA ANA	PG	2120111	R. Bogotá	BUENO	Localizada en tanque de la EAAB, calle 118. Información confiable. Buena representatividad.
33	VITELMA	CO	2120524	R. San Cristóbal	BUENO	Regular representatividad, obstáculos de árboles al este y sur, inciden lluvia y viento.

La gran parte de estaciones se encuentra en buen estado y con aceptable representatividad; sin embargo, existen algunas influencias de obstáculos que valdría la pena tener en cuenta para corregir y así obtener mejor respuesta y garantía del dato, controles de observación, estudiar la posibilidad de reposición para algunos equipos y una de gran importancia como es la revisión de emplazamientos y representatividad para algunas estaciones.

Las condiciones de emplazamiento y representatividad de la estación climatológica de SORATAMA son muy particulares para algunos fines y objetivos por parte de FOPAE, lo que beneficiaría la operación conjunta en tiempo real para el monitoreo y conocimiento de condiciones y eventos significativos derivados de la ocurrencia de lluvias y vientos en ese sector.

En cuanto a la red meteorológica existente de la CAR, su operación y estado de las estaciones es aceptable; no obstante, sería oportuno tener en cuenta algunas recomendaciones para un mejor funcionamiento de la red, entre otras, revisar el estado del instrumental para posible reposición, unificar criterios de toma de información, ajustes de representatividad en cuanto a obstáculos incidentes y control a los observadores a fin de garantizar la información en las diferentes estaciones.

Tabla 39. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica de la CAR

Nº	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
34	APTO GUAYMARAL	CP	2120559	R. Bogotá	BUENO	Ligera incidencia de obstáculos. Toma de observaciones 6am. Toma datos confiables.
35	EL BOSQUE	PG	2120085	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. Confiable.
36	DOÑA JUANA	CP	2120630	R. Tunjuelo	BUENO	Incidencia torre transmisión para heliógrafo para solsticios (10-11am). Confiable. Buena representatividad en general.
37	EDIFICIO M. MEJIA	PG	2120115	R. San Francisco	BUENO	Ubicada azotea edificio CAR, sector parque nacional.
38	LA PICOTA	PG	2120156	R. Tunjuelo	REGULAR	Instrumental mal estado, reposición equipo, mejorar estación. Incidencia obstáculos al sur.
39	SAN JORGE	PG	2120172	R. Soacha	REGULAR	Reposición de equipo. Observaciones dudosas verificar en detalle.
40	TORCA	PM	2120077	R. Bogotá	BUENO	Aceptable representatividad. Confiable. Cercanía con Miguel. A. Caro de IDEAM (Proyecto Globe).
41	EL FUTE	PM	2120166	R. Bogotá	REGULAR	Representatividad regular. Falta colector. Mejorar el estado de estación reponer equipo. Información aceptable.

Las estaciones de la red del DAMA se encuentran en forma normal, pero se advierte incidencias de obstáculos en algunas de ellas, principalmente para las variables de viento y precipitación.

Tabla 40. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica del DAMA

N°	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	LOCALIDAD	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
42	BOSQUE	CO	9999999	Loc. Usaquén	BUENO	Zona urbana. Alto tráfico vehicular. Incidencia de obstáculos.
43	CARREFOUR	CO	9999999	Loc. Engativá	N/S	No visitada.
44	CAZUCA	CO	9999999	Loc. C. Bolívar	BUENO	Zona industrial. Alto tráfico vehicular. Verificar incidencia de obstáculos.
45	CORPAS	CO	9999999	Loc. Suba	BUENO	Representatividad regular, incidencia para viento y lluvia por árboles al norte y oeste además de edificaciones cercanas.
46	ESCUELA DE INGENIERÍA	CO	9999999	Loc. Suba	BUENO	Regular representatividad para vientos y precipitación, incidencia construcciones cercanas.
47	FONTIBON	CO	9999999	Loc. Fontibón	BUENO	Representatividad regular, en azotea edificio, 4° piso.
48	I.D.R.D.	CO	9999999	Loc. Br. Unidos	BUENO	Buena representatividad. Revisar orientación instrumental radiación.
49	MAVDT	CO	9999999	Loc. Santa Fe	BUENO	Zona urbana. Alto tráfico vehicular. Ligera incidencia de obstáculos.
50	MERCK	CO	9999999	Loc. Pte. Aranda	BUENO	Representatividad regular, en azotea edificio 4° piso. Localizada carrera 65 con calle 10.
51	SANTO TOMAS	CO	9999999	Loc. Chapinero	BUENO	Representatividad regular, en azotea edificio, 15 metros de altura. Localizada calle 72xcra9
52	SONY	CO	9999999	Loc. Kennedy	REGULAR	Representatividad regular. Incidencia de obstáculos.

Es recomendable verificar en forma regular en las visitas, los comportamientos de las variables con métodos de calibración o patrones a fin de garantizar la confiabilidad del dato y si los obstáculos inciden o no en la variable.

La red de FOPAE necesita mejorar su operación y control de instrumental para garantizar la información en tiempo real y ofrecer un positivo monitoreo en las zonas de cobertura en cada uno de los sitios destinados para control. Es conveniente verificar lo relativo a la representatividad y ubicación de cada estación, con el fin de superar y corregir obstáculos que inciden en la veracidad de los datos. Igualmente revisar los paneles solares en cuanto a su ángulo de inclinación. Se recomienda tener en cuenta la propuesta de ubicación de nuevas estaciones presentada a FOPAE, para un mejor ajuste de la red en el área de Bogotá y la parte de la cuenca alta del río Tunjuelo.

Tabla 41. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica del FOPAE

N°	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
53	DECANTADOR	PM	120F	R. San Cristóbal	BUENO	Cercana a Vitelma. Representatividad regular. Estudiar reubicación o en su defecto reubicar a Vitelma.
54	DOÑA JUANA	PM	170F	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. CAR posee estación meteorológica en el mismo sitio. Verificar elevación.
55	JUAN REY	PM	130F	Q. Chiguaza R. Tunjuelo	MALO	Piedemonte divisoria de aguas de la zona. Inactiva. Existen 2 estaciones de diferentes entidades.
56	QUIBA MIRADOR	PM	110F	Q. Limas R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. Localizada en Tanque Acueducto. Verificar elevación y orientación e inclinación panel solar.
57	SAN BENITO	PM	160F	R. Tunjuelo	REGULAR	Incidencia de construcciones. Verificar panel solar. Sector urbano, alta contaminación.
58	SANTA MARIA MICAELA	PM	190F	Q. Yomasa R. Tunjuelo	BUENO	Aceptable representatividad. Ubicada a 10 metros de altura.
59	SIERRA MORENA	PM	100F	R. Tunjuelo	BUENO	Verificar elevación.
60	TANQUE PARAÍSO	PM	150F	Q. Las Delicias	MALO	Representatividad regular. Inactiva. Obstáculos al norte - noreste árboles inciden datos de lluvia. Local. cile43xcra3 este.
61	U. ANTONIO NARIÑO	PM	180F	R. Tunjuelo	BUENO	Representatividad regular. Panel solar rectificar ángulo de inclinación. Ubicada en terraza de iglesia, 10 m de altura.
62	VITELMA	PM	140F	R. San Cristóbal	BUENO	Regular representatividad, cercanía de árboles al este y al sur incide para datos de lluvia. Estudiar reubicación.

Por otra parte, se deben buscar alternativas de operación y control con estaciones de otras entidades con el objeto de aprovechar la infraestructura existente, complementando así el cubrimiento necesario para los

finés y aplicaciones en el contexto de prevención y monitoreo de emergencias y desastres, al igual que planes o actividades futuras que proyecte la institución.

La red meteorológica del IDEAM es aceptable y posee una cobertura suficiente para suplir las necesidades básicas en el conocimiento y análisis de variables, las estaciones que hacen parte de esta red son mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 42 Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica del IDEAM

N°	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
63	ADPOSTAL	ME	2120600	R. Bogotá	BUENO	Representatividad regular en azotea edificio 3° piso.
64	APTO CATAM	CP	2120657	R. Bogotá	BUENO	Automática. No ubicada en cabecera pista. Panel solar no cumple norma de inclinación. Chequear sensores regularmente.
65	APTO EL DORADO P 1-2	CP	2120579	R. Bogotá	BUENO	Definir la localización de Catam y Aeropuerto, dado que es la misma estación en representatividad.
66	AUSTRALIA	PM	2120130	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad. Confiable. Parte media cuenca del río Tunjuelo. Mejorar condiciones físicas.
67	CASABLANCA	ME	2120606	R. Balsillas. Mosq	BUENO	Buena representatividad. Confiable de información temp. mínima y lluvias.
68	CEA. Centro Est. Aeron.	CP	2120670	R. Bogotá	MALO	No es representativa del lugar, deficiente información. Aprovechar estación para otro sitio.
69	CENTRO MEDICO ANDES	PG	2120573	R. Bogotá	BUENO	Representatividad regular en azotea edificio 5° piso.
70	COL. NUEVO RETIRO	CO	2120668	R. Bogotá	BUENO	P. Globe. Mala orientación caseta. Incidencia de construcciones todas direcciones inciden variables.
71	COL. BUCKINGHAM	CO	2120667	R. Bogotá	REGULAR	P. Globe. Mala orientación caseta. Incidencia de árboles y construcciones para viento y lluvia. Cercana con UDCA y M. A. Caro.
72	CORP. UNIV. AGROP. UDCA	CO	2120626	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad. Loc. calle 222 con autopista Norte. Confiable. Cercana con la Escuela Col. de Ing. definir un solo punto.
73	E. DURAN DUSSAN	CO	2120662	R. Bogotá	REGULAR	Proyecto Globe. Mala orientación caseta. Incidencia de construcciones al norte. Considerar replanteo y ajuste red proyecto.
74	EFRAIN CAÑAVERA	CO	2120661	R. San Francisco	REGULAR	P. Globe. Regular representatividad. Incidencia obstáculos al sur. Corregir orientación caseta.
75	EL MINUTO DE DIOS	CO	80046	R. Tunjuelo	BUENO	Regular representatividad. Verificar ángulo panel solar. Incidencia obstáculos p/viento del sur. Cercanía con estación Sierra Morena (Fopae).
76	EMMANUEL DÁLZON	PM	2120123	R. Tibabuyes	BUENO	Ubicación 3° piso, azotea edificación. Datos confiables y garantizados. Sector urbano.
77	ESAP	ME	2120604	R. Bogotá	BUENO	Representatividad regular, ubicada en azotea 4° piso.
78	ESC. COL. INGENIERÍA	CP	2120605	R. Bogotá	REGULAR	Buena representatividad. Funcionamiento deficiente, malas condiciones de instalaciones. Aprovechar estación otro sitio.
79	ESCUELA LA UNION	PM	2120120	R. Mugroso	BUENO	Buena representatividad, parte alta de río Mugroso. Confiabilidad regular. Más control para observador fin garantizar datos.
80	FLORES CHIBCHA	ME	2120588	R. Subachoque	BUENO	Representatividad buena. Confiable información de temperaturas mínimas y lluvias.
81	FLORES COLOMBIANAS	ME	2120621	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad y toma de datos. Confiable. Climatológica.
82	GRANJA PROVIDENCIA	CO	2120598	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad. Vía Subachoque. Confiable de información.
83	GRANJA SAN JORGE	CO	2120572	R. Soacha	BUENO	Visitarla con más frecuencia, observación no confiable, se detectó falsedad en algunos registros. Buena representatividad.
84	INEM-KENNEDY	CO	2120656	R. Bogotá	BUENO	Representatividad regular Incidencia de obstáculos al este y norte para vientos y brillo solar. Sector urbano.
85	HACIENDA TIBACHOQUE	ME	2120595	R. Bogotá	BUENO	Buena representatividad .Información deficiente no muy confiable.
86	HDA LAS VEGAS	CO	2120623	R. Bogotá	BUENO	Información confiable. Carece de heliógrafo valdría la pena el registro de esta variable.
87	INEM SANTIAGO PEREZ	CO	2120666	R. Tunjuelo	MALO	P. Globe. Incidencia de obstáculos al norte y sur, inciden para vientos y lluvias. Corregir orientación caseta.

Tabla 42. Situación y estado de las estaciones comprometidas en la red meteorológica del IDEAM

N°	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	CORRIENTE	ESTADO	COMENTARIOS Y CONCEPTOS GENERALES
88	INSTITUTO MERANI	CO	2120650	R. Bogotá	MALO	Mala representatividad. Inactiva. Reubicar en proximidades mejorar condiciones y continuidad de series (Calle 182 con cra 67).
89	JARDÍN BOTÁNICO	CO	2120571	R. Bogotá	BUENO	Carece de representatividad por emplazamientos de árboles en el entorno, incidencia general para las variables.
90	LA UNIÓN	PM	2120132	Emb. Muña	BUENO	Buena representatividad de la zona. Alrededores represa El Muña. Datos confiables.
91	MIGUEL ANTONIO CARO	CO	2120669	R. Bogotá	REGULAR	P. Globe. Incidencia de obstáculos al este y sur para vientos. Caseta mala orientación.
92	NUEVA GENERACIÓN	CO	2120660	R. Bogotá	BUENO	P. Globe. Mala representación para vientos. La caseta requiere orientación al norte. Calidad de la información, regular, en cuanto a acumulados de lluvia.
93	PASQUILLA	PM	2120158	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad para la parte media de la cuenca del río Tunjuelo. Confiable. Podría apoyar la red de Fopae en tiempo real.
94	RADIOSONDA EL DORADO	CO	2120613	R. Bogotá	BUENO	Observación de lluvias-brillo solar en azotea, altura 3 metros. Representatividad buena. Conveniente unificar un solo punto.
95	SAN CAYETANO	CO	2120665	R. Tunjuelo	REGULAR	P. Globe. Caseta mala orientación. Incidencia de construcciones al este para vientos, lluvia y demás variables.
96	SAN JOSE	CO	2120664	R. Tunjuelo	REGULAR	P. Globe. Caseta mala orientación. Incidencia de construcciones al este y norte para vientos, lluvia y demás variables.
97	SENA K 30	ME	2120584	R. Fucha	BUENO	Representatividad regular, ubicada en azotea 4° piso.
98	SENA – MOSQUERA	CO	2120655	R. Balsillas	BUENO	Regular funcionamiento. La estación de Tibaitatá se encuentra a 600 metros de distancia, no amerita mantenerla en este punto.
99	STA MARIA DE USME	PM	2120124	R. Tunjuelo	BUENO	Buena representatividad. Confiable. Existen estaciones de Fopae y Dama. Falta mejorar condiciones físicas.
100	TIBAITATA	CP	2120542	R. Balsillas. Mosq	BUENO	Buena representatividad. Confiable. Posee sistema automático. Verificar inclinación de ángulo panel solar.
101	UNIV. NACIONAL	CP	2120622	R. Bogotá	REGULAR	Falta observadores. Verificar inclinación panel solar. Incidencia de obstáculos al noroeste para viento y radiación.
102	VENADO DE ORO	CO	2120558	R. Bogotá	REGULAR	Mala representatividad. Inactiva. Información poco confiable, situación de microclima. HLG no registro a partir 9am.

En la red meteorológica del IDEAM se encuentran inconsistencias que vale la pena tener en cuenta con el fin de lograr una mayor confiabilidad de la información:

- Gran parte de las estaciones se advierten con interferencias de construcciones y árboles, incidiendo notoriamente en las diferentes variables, incumpliendo las normas internacionales establecidas para la buena representatividad en la toma y registros de la información.
- Se aprecian fallas por parte de los observadores, particularmente en toma de datos, ausencia e irregularidad en los horarios de observación.

Debido a lo anterior, se recomienda:

- Estudiar la posibilidad para un ajuste y definir criterios de ubicación, en particular, para estaciones cercanas una de otra, dando lugar a duplicidad de información en la misma zona, demandando mayores gastos de operación. Evaluar condiciones de reubicación o suspensión definitiva para determinadas estaciones.
- Mejorar las condiciones físicas de las instalaciones en algunas estaciones. En estaciones automáticas se debe verificar la correcta inclinación y ángulo de los paneles solares.

- Realizar visitas de operación y control más regulares al menos cada dos o tres meses, a fin de hacer presencia institucional y garantizar el buen desempeño de los observadores, para obtener un mejor resultado y fiabilidad de la información meteorológica en la región.
- Finalmente, con respecto a las estaciones del Proyecto Globe, es necesario concentrar esfuerzos con el fin de reajustar las localizaciones actuales de estaciones, corregir emplazamientos y dar la importancia dentro del contexto general en apoyo a la optimización y representatividad de las variables meteorológicas, consolidando de esta forma una confiabilidad en la información en general y cobertura de la región.

3.5 Ajuste y diseño de la red meteorológica de FOPAE

3.5.1 Antecedentes

La existencia del documento sobre el Diseño de la Red de Alertas, dentro del Proyecto Red de Alertas Hidrometeorológicas para Inundaciones y Fenómenos de Remoción en Masa en el Suroriente de Santafé de Bogotá, presentado en febrero de 2000, en el marco del Convenio Especial de Cooperación N° 017/1998CO IDEAM-FOPAE, permite identificar y evaluar sus objetivos como son el desarrollo del diseño, montaje y operación de la red para efectos hidrometeorológicos, alertas y fenómenos de remoción en masa e inundaciones, ubicadas en los cerros orientales de Bogotá y sectores de la capital, donde se abarcaron áreas de la parte media y alta del río Tunjuelo.

En efecto y en consideración a los resultados y análisis desarrollados por el grupo de conformación científica en las diferentes áreas a saber: Hidrología, Meteorología, Geomorfología, Redes Hidrometeorológicas, Información Ambiental y Cartografía Digital del IDEAM, se dispuso de los diferentes análisis en cada campo, constituyendo así un amplio y concreto resultado para el diseño de la Red Hidrometeorológica y de Alertas en el área de estudio mencionada.

3.5.2 Red meteorológica actual de FOPAE, con registros de precipitación

Teniendo en cuenta que la red se adaptó y comenzó su funcionamiento en el año 2000 y han transcurrido 6 años al 2006, se advierten algunas ocurrencias de fenómenos significativos en áreas de Bogotá, principalmente en sectores de los cerros orientales y la cuenca del río Tunjuelo, así como el conocimiento de algunas deficiencias en los entornos, por lo cual exige la complementación de puntos para un mejor seguimiento, monitoreo y de coberturas representativas en el área de Bogotá, conducentes al mejoramiento de los sistemas de alertas y prevención de desastres en tiempo real y aviso rápido del comportamiento pluviométrico, lo que influye y está fuertemente ligado de manera directa, en la ocurrencia de crecientes súbitas particularmente en las quebradas de régimen torrencial, situadas en los sectores de los cerros orientales de Bogotá y que originan inundaciones y anegaciones a lo largo y ancho de sus cauces. Las estaciones medidoras de lluvia con que cuenta actualmente el FOPAE son (Ver Mapa 30):

1. DECANTADOR
2. DOÑA JUANA
3. JUAN REY
4. QUIBA
5. SANTA MARÍA MICAELA
6. SAN BENITO
7. SIERRA MORENA
8. TANQUE PARAÍSO

9. U. ANTONIO NARIÑO
10. VITELMA

3.5.3 Identificación de puntos críticos en los últimos 6 años y propuesta de complementación

Por lo anterior y retomando algunas recomendaciones del estudio sobre el Diseño de la Red de Alertas (febrero de 2000), y de lo analizado en eventos nuevos, era preciso reajustar algunos sectores críticos de acuerdo con los inventarios sobre ocurrencia de fenómenos significativos de algunas quebradas en los últimos años de 2000 a 2006, igualmente complementar y ajustar coberturas deficientes desde el punto de vista meteorológico, orientadas a contribuir a una mejor comprensión en los análisis en tiempo real para ajuste de pronóstico local en las diferentes zonas, utilidad en la alimentación de modelos matemáticos lluvia-escorrentía y complementos generales de alertas hidrológicas. La propuesta general esta conformada de los siguientes 16 puntos (Ver Mapa 31 con los sitios propuestos):

Los puntos críticos como tal se identificaron en:

1. Quebrada Las Delicias y Quebrada La Vieja, se recomienda la adaptación y complementación de la estación San Luís de propiedad del Acueducto, en tiempo real para FOPAE.
2. Sector comprendido en el nacimiento de las quebradas Aguamonte afluente de la Quebrada Chiguaza en cota aproximada de 3400 msnm (posible traslado de alguna de las estaciones Vitelma ó Decantador).

Como puntos de complementación y ajuste:

3. Parte alta de la cuenca del río Tunjuelo, divisoria de aguas, Estación Los Tunjos de propiedad del Acueducto.
4. Sector comprendido en las cuencas de los ríos Mugroso y Curubital, cota de 3400 a 3500 msnm.
5. Parte alta de la cuenca de río Tunjuelo, sector de El Hato, propiedad de Acueducto.
6. Sector de la parte media sobre la margen occidental del río Tunjuelo, en el sitio de Pasquilla, propiedad del IDEAM.
7. Sector comprendido entre las Quebradas Corinto y La Taza, parte alta.
8. Sector de la parte alta de la quebrada Piedra Gorda.
9. Sector del norte de Bogotá, en áreas de los cerros orientales, en el barrio Soratama (localidad de Usaquén), calle 167 x cra1 este, San Cristóbal Norte, predios de Acueducto y con estación automática. Este sitio es de gran representatividad para todo el sector a lo largo de los cerros orientales, desde Usaquén hacia el norte del sector.
10. El Delirio (EAAB) parte alta de la cuenca del río Fucha.
11. Sector comprendido entre los cerros de Guadalupe y Monserrate, cotas de 3100 a 3300 msnm.

Sin embargo se observaron otros sitios en visita conjunta FOPAE e IDEAM como fueron:

12. Escuela La Unión (IDEAM) ubicada en el sector de la cuenca alta del río Mugroso. Puede ser adaptada por FOPAE en tiempo real.
13. Universidad Antonio Nariño, Sede Circunvalar, en reemplazo a la adaptación que se realizaría en tiempo real de la estación San Luís. Se instalaría para monitorear las quebradas Las Delicias y La Vieja.
14. Guadalupe, para el monitoreo de lluvias y apoyo para transmisión de la cobertura de la red general de estaciones en tiempo real.

15. Cerro Cazadores, para apoyo al monitoreo de lluvias de la Quebrada Chicó y alrededores.
16. Mochuelo, monitoreo de la cuenca alta de las quebradas La Trompeta y La Estrella.

3.5.4 Reconocimiento de áreas y sitios propuestos

Se realizaron las visitas de reconocimiento a los sitios anteriores, de manera conjunta entre el FOPAE y el IDEAM, a fin de conocer la representatividad del sector, coordenadas geográficas, elevación, garantía de funcionamiento y operatividad de la estación, así como la seguridad y posibilidad de transmisión de información en tiempo real habilitada con la red actual.

3.5.5 Expansión, ajuste y diseño de la red meteorológica de FOPAE

De acuerdo con los análisis y situación de las estaciones actuales de FOPAE y teniendo en cuenta la recomendación de OMM en el punto del numeral 3.4.3, además de sus aspectos de línea óptima para transmisión de información, se definen los puntos consignados en la siguiente tabla:

Tabla 43. Estaciones para ajuste y diseño de la red meteorológica de FOPAE

ESTACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	ELEVACIÓN	CUENCA	OBSERVACIONES
Esc. La Unión IDEAM	04° 20' 33.5" N 74° 11' 01.7" W	3405	R. Mugroso	Ajustada para tiempo real.
PASQUILLA IDEAM	04° 26' 46.4" N 74° 09' 17.5" W	2989	R. Tunjuelo	Ajustada para tiempo real.
LA ESPERANZA	04° 27' 4.8" N 74° 06' 40" W	2864	Quebradas Corinto y La Taza	Nueva instalación.
GUADALUPE	04° 35' 31.1" N 74° 03' 16.6" W	3299	R. San Francisco.	Nueva instalación.
U. A. NARIÑO CIRCUNVALAR	04° 38' 11.9" N 74° 03' 36.1" W	2771	Quebradas Las Delicias y La Vieja.	Nueva instalación. Sede de U. A. Nariño
CERRO CAZADORES	04° 39' 56.6" N 74° 01' 42.5" W	3255	Quebrada Chicó	Nueva instalación. Sede de la RadioSystem

Igualmente se recomienda:

1. La reubicación de la estación Decantador o Vitelma, que por su cercanía (menos de 1 kilómetro), muestran una alta correlación en la información. La estación podía reinstalarse en el sector de la parte alta en cota aproximada de 3400, cerca al nacimiento de la quebrada Aguamonte, afluente de la quebrada Chiguaza, así se obtendría una mejor distribución, cobertura y un monitoreo de la precipitación en tiempo real en esta zona.
2. La estación Tanque Paraíso, se encuentra actualmente inactiva (sin instrumental), se recomienda ponerla en funcionamiento hasta una vez instalada la estación UAN Sede Circunvalar.

En la tabla 44, se presenta un resumen de la red complementada de FOPAE, teniendo en cuenta las estaciones existentes y ajustadas a la nueva red, con las respectivas sugerencias. Así mismo se muestran en el Mapa 32. Red complementada de estaciones existentes y ajustadas.

Tabla 44. Estaciones Meteorológicas de la red FOPAE

ESTACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	ELEVACIÓN	CUENCA	ESTADO	OBSERVACIONES
ESCUELA LA UNIÓN	04°20'33.5"N 74°11'01.7" W	3405	R. Mugroso	Para instalación	Actual de IDEAM
PASQUILLA	04°26'46.4"N 74°09'17.5" W	2989	R. Tunjuelo	Para instalación	Actual de IDEAM
LA ESPERANZA	04° 27' 4.8" N 74° 06' 40" W	2864	Quebradas Corinto y La Taza	Para instalación	
USME. U. A. NARIÑO	04°28'53.2"N 74°07'37.0" W	2770	R. Tunjuelo	Existente	
DOÑA JUANA	04°30'02.9"N 74°08'14.6" W	2859	R. Tunjuelo	Existente	
STA MARÍA MICAELA	04°30'2.0"N 74°05'10.6" W	3075	Q. Yomasa	Existente	
JUAN REY	04°31'7.0"N 74°05'18.7" W	3118	Q. Verjones	Habilitar	
QUIBA	04°32'34.6"N 74°09'21" W	3060	Q. Limas	Existente	
SAN BENITO	04°33'52.3"N 74°08'15.6" W	2660	R. Tunjuelo	Existente	
SIERRA MORENA	04°34'29.8"N 74°10'14.4" W	2823	R. Tunjuelo	Existente	
DECANTADOR	04°34'18.0"N 74°04'6.8" W	2785	R. San Cristóbal	Existente	
VITELMA	04°34'31.0"N 74°04'18.8" W	2793	R. San Cristóbal	Existente	Para Reubicación
GUADALUPE	04°35'31.1"N 74°03'16.1" W	3299	Q. Roosevelt- R. S. Francisco	Para instalación	
TANQUE PARAÍSO	04°37'40.8"N 74°03'30.2" W	2820	R. Arzobispo	Habilitar	Para Reubicación luego que entre en funcionamiento Circunvalar
CIRCUNVALAR U. A. NARIÑO	04°38'11.9"N 74°03'36.1" W	2771	Q. Las Delicias y La Vieja	Para instalación	
CERRO CAZADORES	04°39'56.6"N 74°01'42.5" W	3255	Q. Chicó	Para instalación	

3.5.6 Evaluación de calidad de Información Meteorológica de la Red FOPAE

Analizando la calidad de la información, se observa que el rendimiento por estación no ha sido el esperado, ya que en algunos años se encuentran series incompletas y en otras prácticamente no se cuenta con registros, estaciones Juan Rey, San Benito (lluvias) y Tanque Paraíso. De las 10 estaciones meteorológicas actuales, 7 de ellas tienen buena información.

Al realizar comparaciones con valores de algunas estaciones cercanas de otras entidades, los datos muestran una gran consistencia y correlatividad. Es conveniente realizar muestreos continuos y comparar datos de estaciones automáticas con estaciones convencionales, pues se observan algunas diferencias significativas entre los datos registrados en superficie y los tomados en edificaciones con alturas de 8 o más metros, como es el caso de algunas estaciones de la red. Igualmente, se observa la incidencia de obstáculos naturales o artificiales, que es necesario controlar para evitar cualquier efecto negativo en la toma del dato y garantizar su calidad.

3.6 Ajuste y diseño de la red meteorológica del IDEAM

3.6.1 Antecedentes

Como se refirió en el punto 4.1, sobre generalidades de la red meteorológica, hasta el año de 1968 la red de observación y medición de elementos y fenómenos meteorológicos estaba a cargo de diferentes entidades las cuales requerían la información para fines específicos; por lo tanto y dada la situación se originaba diferentes normas de instalación, operación, instrumental, toma de observaciones, cálculo de las diferentes variables etc., lo que contribuía al desorden y obtención de la información en forma heterogénea, disparidad de criterios, discontinuidad y duplicidad de información, esfuerzos humanos y económicos.

En efecto y en consideración a lo anterior en el año de 1968, se creó el Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH), institución que integró, planificó y estableció la Red Meteorológica Nacional, mediante el apoyo técnico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y comenzando así una nueva faceta de avance, nacional e internacional de la Meteorología y la Hidrología de Colombia. Posteriormente por cambios de carácter administrativo el SCMH se designó HIMAT y hoy en día se denomina IDEAM, como autoridad meteorológica en el país.

3.6.2 Red meteorológica actual del IDEAM en Bogotá

La red básica se adaptó y comenzó su funcionamiento en el año 1971 y han transcurrido 25 años al 2006, de las estaciones de la red básica definida en el comienzo, se encuentran actualmente cinco (5) a saber:

1. Aeropuerto El Dorado
2. Jardín Botánico
3. OMN. Universidad Nacional
4. Venado de Oro
5. Granja San Jorge

En la actualidad existen 33 estaciones de variada categoría entre las cuales están: sinóptica, climatológica, pluviométrica y de fines especiales (Tabla 45 y Mapa 33). Desafortunadamente, para la elaboración del presente documento, no se pudo obtener la justificación y el soporte oficial que contemple la importancia del emplazamiento en donde se encuentran ubicadas las 28 estaciones instaladas desde el año 1971 a la fecha.

Tabla 45 Estaciones meteorológicas del IDEAM existentes en el área de Bogotá y en la cuenca alta del río Tunjuelo

Número de orden	ESTACIÓN	CTG	CÓDIGO	LAT.	LONG.	ELEV.	PROYECTO
1	ADPOSTAL	ME	2120600	4°41	74°08	2550	RED GENERAL
2	APTO CATAM	CP	2120657	4°42	74°09	2546	RED GENERAL
3	APTO ELDORADO P 1-2	CP	2120579	4°42	74°08	2547	RED GENERAL
4	AUSTRALIA	PM	2120130	4°24	74°08	3050	RED GENERAL
5	BILBAO	CO	2120663	4°45	74°06	2600	P. GLOBE
6	CEA. Centro Est. Aeron.	CP	2120670	4°41	74°08	2545	RED GENERAL
7	CENTRO MEDICO ANDES	ME	2120573	4°42	74°02	2575	RED GENERAL
8	COL. BUCKINGHAM	CO	2120667	4°47	74°03	2574	P. GLOBE
9	COL. NUEVO RETIRO	CO	2120668	4°44	74°02	2570	P. GLOBE
10	CORP. UNIV. AGROP. UDCA	CO	2120626	4°48	74°03	2570	RED GENERAL
11	E. DURAN DUSSAN	CO	2120662	4°38	74°10	2562	P. GLOBE
12	EFRAIN CAÑAVERA	CO	2120661	4°35	74°04	2804	P. GLOBE

13	EL MINUTO DE DIOS	CO	80046	4°34	74°10	2700	RED GENERAL
14	EMMANUEL DÁLZON	PM	2120123	4°42	74°04	2520	RED GENERAL
15	ESAP	ME	2120604	4°39	74°06	2553	RED GENERAL
16	ESC .COL. INGENIERIA	CP	2120605	4°47	74°03	2650	RED GENERAL
17	ESCUELA LA UNIÓN	PM	2120120	4°20	74°11	3320	RED GENERAL
18	GRANJA SAN JORGE	CO	2120572	4°31	74°11	2900	RED GENERAL
20	HDA LAS VEGAS	CO	2120623	4°40	74°09	2543	RED GENERAL
19	INEM-KENNEDY	CO	2120656	4°08	74°38	2580	RED GENERAL
21	INEM SANTIAGO PEREZ	CO	2120666	4°34	74°08	2565	RED GENERAL
22	INSTITUTO MERANI	CO	2120650	4°47	74°03	2570	RED GENERAL
23	JARDÍN BOTÁNICO	CO	2120571	4°41	74°06	2552	RED GENERAL
24	MIGUEL ANTONIO CARO	CO	2120669	4°49	74°02	2700	P. GLOBE
25	NUEVA GENERACIÓN	CO	2120660	4°43	74°05	2590	P. GLOBE
26	PASQUILLA	PM	2120158	4°27	74°10	3000	RED GENERAL
27	RADIOSONDA	CP	2120613	4°42	74°15	2546	RED GENERAL
28	SAN CAYETANO	CO	2120665	4°35	74°05	3100	P. GLOBE
29	SAN JOSÉ	CO	2120664	4°30	74°07	2700	P. GLOBE
30	SENA K 30	ME	2120584	4°36	74°07	2553	RED GENERAL
31	STA MARÍA DE USME	PM	2120124	4°30	74°07	2800	RED GENERAL
32	UNIV. NACIONAL	CP	2120622	4°38	74°06	2556	RED GENERAL
33	VENADO DE ORO	CO	2120558	4°36	74°06	2725	RED GENERAL

Lo anterior, se ha manejado con criterios de solicitudes por organismos o instituciones que requieren la información, pero no se ha realizado un estudio de ajuste o rediseño, el cual con base en los análisis de las diferentes variables genere resultados que indiquen la falta de información o complementación para una mejor distribución y análisis del comportamiento climatológico en el área de Bogotá.

No obstante, aunque algunas estaciones fueron emplazadas en sitios como los ya referidos, se encuentran relativamente bien localizadas y con aceptable representatividad, al igual con series de datos superiores a los 10 años, las cuales son de todos modos parte de la red y por tal motivo no sería necesario el traslado o rediseño de estas; sin embargo, otras no satisfacen las condiciones y por tal motivo valdría la pena un replanteamiento o rediseño, con el fin de lograr una mejor distribución y contribución del conocimiento y comportamiento de las variables en el área de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo.

3.6.3 Identificación de sitios faltantes de acuerdo con los análisis de algunas variables y propuesta de complementación

De acuerdo con los análisis realizados dentro del marco del estudio de la caracterización climática para Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo, se advierten algunos sectores de gran vacío para la continuidad y análisis de variables meteorológicas, ocurrencias de fenómenos significativos en áreas de Bogotá, principalmente en sectores de los cerros orientales y la cuenca del río Tunjuelo, así como el conocimiento de algunas deficiencias en los entornos, tal es el caso de temperatura, humedad, precipitación, viento, insolación, etc., para lo cual es preciso reajustar estos sectores críticos de faltante de información, con el fin conocer, complementar y ajustar coberturas deficientes desde el punto de vista meteorológico, orientadas a contribuir a una mejor comprensión en los análisis de características temporales y espaciales, seguimiento, monitoreo y de coberturas representativas en el área de Bogotá, conducentes al mejoramiento de los sistemas de alertas y prevención de desastres en tiempo real y aviso rápido del comportamiento pluviométrico, conocimientos de la variable en tiempo real para ajuste de pronóstico local en las diferentes zonas, utilidad en la alimentación de modelos matemáticos de lluvias y complementos generales de carácter hidrometeorológico en el área descrita.

Los puntos de ajuste para las variables de temperatura, insolación y viento se identificaron en los sectores mostrados en el Mapa 34. (Estaciones existentes y ajustadas, según Tabla 45 y Tabla 46), los cuales se describen a continuación:

1. En el sector norte de la ciudad de Bogotá, en el área de Usaquéen comprendida entre calles 127 y 180, sobre la carrera 7 hacia arriba.
2. Sector comprendido en inmediaciones del humedal La Conejera en Suba, al respecto la actual estación Instituto Merani puede ser trasladada para suplir este complemento.
3. Parte alta de los cerros orientales en cotas aproximadas de 3100 – 3300 msnm, entre Guadalupe y Monserrate.
4. Sector comprendido en las cuencas de los ríos Mugroso y Curubital, cota de 3200 a 3500 msnm, al respecto, a este sector ya se realizó visita conjunta con el IDEAM y el FOPAE, para determinar y seleccionar el sitio, el cual se encuentra localizado en la divisoria de aguas en las veredas “Los Arrayanes y Los Alpes”, en la hacienda Villa Teresa con coordenadas: latitud norte: 04°21’34.2” N y longitud oeste: 74°09’46.8” W, con elevación: 3224 msnm. Dicha estación será operada por el IDEAM (vía satelital).
5. En la localidad de Bosa, al suroeste de la ciudad de Bogotá, aproximadamente en las coordenadas 04°36’N y 74°12’W, entre las cotas 2550 a 2600 msnm.
6. Sector sureste de la ciudad, entre cotas de 2900 a 3200msnm, en las coordenadas 04°28’N y 74°04’W. (sector de San Cristóbal, antigua salida al Llano).
7. Sector donde se ubica el Humedal Córdoba-Niza, el cual esta comprendido entre las coordenadas 04° 40’ a 04°42’ N y 74° 04’ a 74°05’ W.

Los puntos de ajuste para precipitación se ubicarían en:

8. En el sector comprendido de la Quebrada Corinto (Vereda Olarte – Localidad de Usme), al sureste de la vertiente oriental de la cuenca del río Tunjuelo.
9. En la zona de la parte media del río Fucha, donde confluye el canal La Fragua, aproximadamente en las coordenadas 04°35’N - 74°06’W, al sur de la zona.
10. Sector circundante al Portal de Suba (antigua ubicación de la estación Bilbao), ubicada aproximadamente en las coordenadas 04°45’ N – 74° 06” W.
11. Sector norte de los cerros orientales de Bogotá, desde la calle 167 con carrera 7 hacia el este (San Cristóbal Norte). Este sitio estaría siendo de gran representatividad para todo el sector a lo largo de los cerros orientales desde Usaquéen hacia el norte.
12. Sector occidental de la cuenca alta del río Tunjuelo, área circundante de la quebrada El Oso, en cota de 3400 a 3600 msnm, coordenadas geográficas aproximadas 04°21’ N y 74°12’ W.

Tabla 46 con sitios propuestos (12).

Tabla 46. Estaciones para el Ajuste de la Red Meteorológica de IDEAM

ESTACIÓN	COORDENADAS DE REFERENCIA (aprox.)	ELEVACIÓN	VARIABLES	OBSERVACIONES
1. Norte de Usaquén	04° 45' N 74° 01' W	Entre 2800 a 3000 msnm.	Temperatura Insolación Vientos	Nueva instalación Entre Calles 127 a 180 y Carrera 7 hacia dirección oriente.
2.Conejera-Suba	04° 46' N 74° 04' W	Entre 2600-2900 msnm	Temperatura Insolación Vientos	Posible reubicación de Instituto Merani, o en área cercana.
3. Parte alta cerros orientales	04° 36' N 74° 01' W	Entre 3100 a 3300msnm	Temperatura Insolación Vientos	Nueva instalación Entre Monserrate y Guadalupe
4.Villa Teresa – Parte Sur de Usme	04° 21' N 74° 09' W	3224 msnm	Todas las variables	Nueva instalación. Automática Satelital
5. BOSA	04° 36' N 74° 12' W	Entre 2550 a 2600 msnm	Temperatura Insolación Vientos	Nueva instalación.
6. San Cristóbal Sur	04° 28' N 74° 04' W	Entre 2900 a 3200 msnm	Temperatura Insolación Vientos	Nueva instalación.
7. Humedal Córdoba-Niza	04° 40' N 74° 04' W	Entre 2600 a 2700	Temperatura Insolación Vientos	Nueva instalación
8. Sureste- Q. Corinto - Olarte	04° 26' N 74° 07' W	Entre 3100 a 3300	Precipitación	
9. Río Fucha x Canal La Fragua	04° 36' N 74° 06' W	Entre 2550 a 2600 msnm	Precipitación	
10. Portal de Suba	04° 45' N 74° 06' W	Entre 2550 a 2600	Precipitación	Área circundante de estación Bilbao.
11. San Cristóbal Norte	04° 43' N 74° 01' W	Entre 2550 a 2800 msnm	Precipitación	
12. Parte alta Q. El Oso	04° 21' N 74° 12' W	Entre 3400 a 3600 msnm	Precipitación	Parte alta cuenca del río Tunjuelo. Sector occidental.

Los puntos de complementación se ubicarían en:

- a. La estación *Hacienda Las Vegas*, complementar con Heliógrafo.
- b. La estación *San José* (proyecto Globe), al sur de la ciudad, debe definirse como estación de la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, además corregir fallas técnicas y ubicar en un punto más representativo del área.
- c. La estación *San Cayetano* (proyecto Globe), debe definirse como de la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, corregir fallas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.
- d. La estación *Miguel A. Caro* (proyecto Globe), definirse para la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, además corregir fallas técnicas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.
- e. La estación *Pasquilla*, en el suroeste del área sobre la cuenca media del río Tunjuelo, complementarse con Temperatura y Heliógrafo, para obtener una mejor cobertura del área.
- f. La estación *E. Durán Dussan* (proyecto Globe), debe definirse como de la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, corregir fallas técnicas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.

- g. La estación *El Minuto de Dios* definida en la red general básica, debe complementarse con heliógrafo, además corregir fallas técnicas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.
- h. La estación *Efraín Cañaveral* (proyecto Globe), debe definirse para la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, además corregir fallas técnicas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.
- i. La estación *Nueva Generación* (proyecto Globe), debe definirse para la red climatológica básica y complementarse con heliógrafo, además corregir fallas técnicas y mejorar ubicación en la zona representativa del área.

Por lo tanto queda conformada la propuesta general con los anteriores puntos, 12 propuestos y 9 de complementación para un total de 21.

3.6.4 Reconocimiento de áreas y sitios propuestos.

Se realizó la visita de reconocimiento a la estación de Villa Teresa con personal del IDEAM a fin de definir el sitio de la propuesta, conocer la representatividad del sector, coordenadas geográficas, elevación, garantía de funcionamiento y operatividad de la estación, así como su posición y posibilidad de transmisión de información en tiempo real habilitada con la red actual en el sistema satelital.

3.6.5 Expansión y ajuste de las redes meteorológicas

En consecuencia y con base a lo expuesto en el numeral 3.4.3 y 3.4.4, sobre el Análisis y Recomendaciones de reubicación de estaciones y teniendo en cuenta las recomendaciones de la OMM, en lo relativo a la expansión y ajuste de las redes meteorológicas, se continuó con el análisis y rediseño para la red de estaciones comprometidas en el área de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo, con el fin de alcanzar una cobertura deseada para el conocimiento del régimen y el seguimiento del comportamiento de variables, confiabilidad y exactitud de los datos, registros e información en general.

Además se realizaron curvas de representatividad para temperatura y precipitación, con el objeto de conocer los gradientes y distribuciones, y analizar los faltantes o vacíos de información en las diferentes elevaciones, a fin de ajustar los puntos donde se requiere disponer de información y garantizar en mejor forma las características de los análisis de las variables. Comportamiento de la distribución de la Temperatura vs. Elevación, en el área de Bogotá.

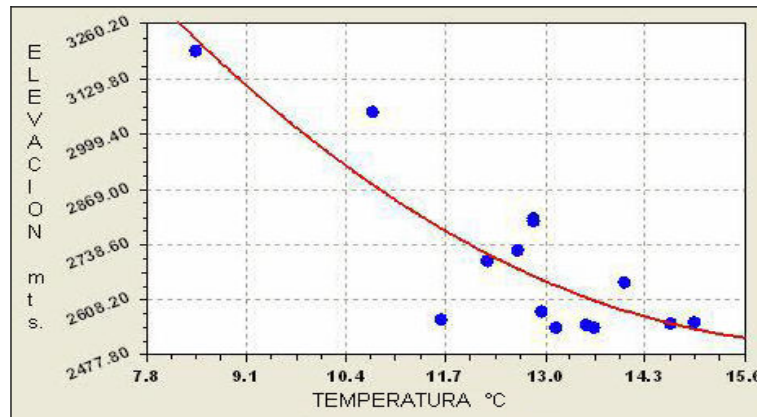


Figura 27. Comportamiento de la temperatura vs. la elevación

La temperatura con la elevación normalmente disminuye en un gradiente teórico de $6,5^{\circ}\text{C}$ /kilómetro; sin embargo, esta situación puede variar según la zona o sector, además de las condiciones e influencias de factores climatológicos para cada ambiente.

Para el caso de la ciudad de Bogotá y con base a la información a nivel anual disponible, se encontró un comportamiento con gradiente aproximado de 6.5°C / 700 metros, más acentuado que el teórico; no obstante, es necesario contar con más información o puntos definidos en elevaciones entre 2800 y 3200 msnm, a fin de calibrar la curva significativa para dicha área.

De acuerdo con lo observado en la gráfica y con el fin de analizar con mayor detalle el comportamiento de la temperatura del área, resulta conveniente ubicar al menos dos puntos de medida en las elevaciones de 2800 a 3200 msnm.

En lo que respecta a la precipitación y dada la complejidad de la variable, se aplica más exigencia de representatividad para la optimización, distribución y el conocimiento de la variabilidad de la lluvia, puesto que existen muchas incidencias, influencias y factores que alteran la normal ocurrencia de las precipitaciones en un área determinada, entre ellas la más sobresaliente el relieve, situación presentada en el área de estudio.

Se han analizado tres comportamientos de la precipitación iniciando en el sector occidental (W) hacia el sureste (SE) y del sector central de la ciudad hacia los sectores del sur-sureste (SSE) y sur-suroeste (SSW), donde se muestra el comportamiento que se adapta a las condiciones de variación de la lluvia en el plano espacial para el área de estudio referida. Ver Figura 28 a la Figura 30.

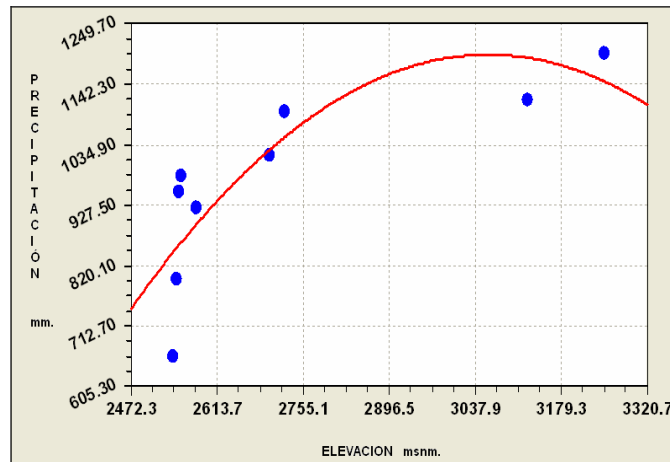


Figura 28. Representación del comportamiento de la Precipitación x Elevación en Bogotá
 Sentido: OESTE - SURESTE (W - SE)

El comportamiento de la curva en la figura está definido por la ecuación cuadrática de tipo $y = a + bx + x^2$ y muestra un aumento de la precipitación a partir del sector occidental hasta alcanzar el óptimo pluvial alrededor de los 3170 metros sobre el nivel del mar con valores de 1200 mm sobre los sistemas montañosos del sureste de la capital para luego decrecer con mayor elevación. El gradiente para este sector se encuentra en 66mm/100metros.

Por otra parte se detecta el vacío de información para referenciar en la curva y obtener registros de lluvia, entre los 2755 y 3100 msnm, lo que es importante para el ajuste de la red pluviométrica con el fin de calibrar este comportamiento en un futuro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda la instalación de dos estaciones de medida de lluvia, entre estas dos cotas a fin de complementar y mejorar la distribución y ajuste de la precipitación en esta zona.

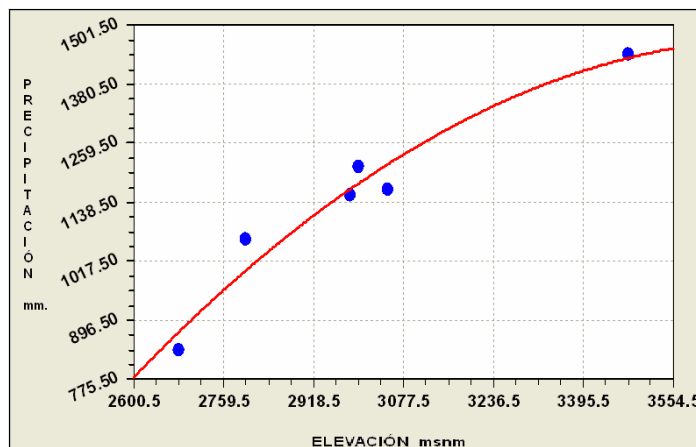


Figura 29. Representación del comportamiento de la Precipitación x Elevación en Bogotá
 Sentido: CENTRO - SURESTE (CENTRO - SSE)

El comportamiento de la curva en la figura está definido por la ecuación cuadrática de tipo $y = a + bx + x^2$ y muestra un aumento de la precipitación con la elevación a partir de 2600 msnm hasta alcanzar los 3550

msnm, y extrapolando la curva sobre los 3600 msnm, se alcanza el óptimo pluvial. El gradiente para este caso es de 70mm/100metros, el mayor para el área.

En este análisis se verifica el faltante de información de lluvia, localizada en elevaciones aproximadas entre 3100 y 3500 msnm, a fin de ajustar la respectiva curva de distribución y gradiente de la zona, así como un mejor conocimiento del régimen pluvial en la cuenca. El gradiente para este sector se encuentra en 70mm/100metros, por lo tanto se recomienda la instalación de al menos dos estaciones de medida de lluvia, entre estas cotas a fin de complementar y mejorar la distribución y ajuste de la precipitación en esta zona.

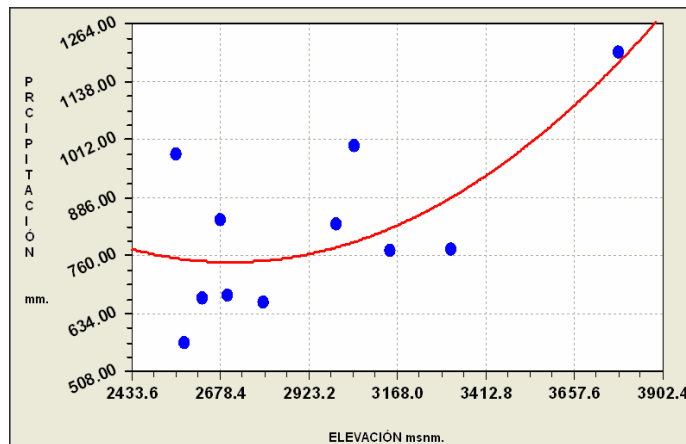


Figura 3Q. Representación del comportamiento de la Precipitación x Elevación en Bogotá Sentido: CENTRO – SURSUROESTE (CENTRO – SSW)

El comportamiento de la curva en la figura está definido por la ecuación cuadrática de tipo $y = a + bx + x^2$ y refleja un comportamiento casi constante de las lluvias entre los 2550 msnm hasta 2930 msnm con precipitaciones cercanas a los 760 mm; posteriormente a partir de esta última cota, el comportamiento es de aumento hasta alcanzar los 3780msnm donde se registran precipitaciones de 1200mm. El gradiente de este comportamiento está en 36mm/100metros, el menor observado en el área. Igualmente se detecta un faltante de información para los ajustes de comportamiento entre 3400 y 3700 msnm.

De los análisis realizados, se concluye que lo más conveniente es ubicar una estación con registro de lluvia, para obtener un mejor ajuste de gradiente y complementar así el análisis de la distribución de la precipitación en la zona.

El Documento Guía de Prácticas Hidrometeorológicas de la WMO - Diseño de Redes N°168-TP.82, numeral 3.2.11.2, se refiere a “Es conveniente anotar que debido a la expansión de áreas urbanas, se requieren redes cuya densidad estará en función de la variabilidad espacial de las lluvias sobre todo aquellas de corta duración”.

Partiendo de los criterios citados en dicho informe y de acuerdo con los resultados de los análisis realizados en la zona de estudio, se adelantó el ajuste de la red meteorológica para Bogotá, basándose en el análisis de la distribución espacial de las lluvias, mostrada con mayor detalle en los mapas generados dentro del estudio y consignados en el documento “Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo”, donde se analizan los sitios que requieren ajustes respecto a la densidad de estaciones meteorológicas, tanto para la lluvia como para otras variables, con el fin de obtener una óptima

representatividad del comportamiento del clima en el área de Bogotá. El rediseño de la red, con los ajustes y complementos realizados para el IDEAM, se muestra en el Mapa 34.

3.6.6 Evaluación de condiciones de la red meteorológica del IDEAM

Realizando un análisis en lo que se relaciona con la calidad de información, se observa que el rendimiento por estación ha sido aceptable en términos generales; sin embargo, en cuanto al dato como representativo y confiable, todo parece indicar que al realizar algunas comparaciones con valores de estaciones de otras entidades, que muestran buena calidad y correlatividad en los meses y años que han transcurrido, es conveniente realizar continuos muestreos y confrontaciones de datos de estaciones automáticas con estaciones convencionales, pues se observan algunas inconsistencias de representatividad del dato en superficie con los registrados en alturas de edificaciones con alturas de 8 , 10 o más metros, como es el caso de algunas estaciones de la red.

Igualmente se observa la presencia de obstáculos naturales o artificiales que inciden negativamente en la toma de información y deben controlarse, para evitar cualquier efecto sobre los registros y así garantizar su calidad.

Por otra parte, la actual red meteorológica básica del IDEAM, se encuentra con algunas inconsistencias, las cuales vale la pena comentarlas para ofrecer una mejor condición y representatividad de los parámetros meteorológicos que ayudan no sólo a mejorar aspectos de pronóstico en tiempo real, sino a obtener una buena aceptabilidad y distribución para los fines del conocimiento del clima en la región, sobre todo cuando se caracterizan climas de carácter rural y la tendencia marcada al crecimiento rápido en la zona urbana, en un alto porcentaje como es el caso de Bogotá.

Se observa entonces algunos aspectos a saber:

- a. La mayoría de pluviómetros de larga duración se encuentran emplazados en las azoteas de los edificios, con alturas de 10 hasta 15 metros sobre la superficie. Al respecto, aunque en realidad el área urbana está en constante aumento, no permite emplazar con las debidas condiciones de representatividad los aparatos para la toma de la variable, se tiene que recurrir a ubicarlos en estos sitios, debido a la falta de espacio y sitios que cumplan las normas y condiciones específicas de instalación.

Por lo anterior, el IDEAM debe dirigir una consulta de carácter oficial a la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para referir esta situación, dado que hoy en día en las grandes urbes se debe observar la misma problemática que se tiene en nuestro país, en particular en la ciudad de Bogotá; de esta forma obtendremos una concreta respuesta y normas adelantadas sobre esta inquietud a nivel internacional.

Se considera, dadas algunas pruebas al respecto, que por causa de la altura con relación a la superficie, donde debe registrarse la precipitación para determinado sitio, se pierde un porcentaje aproximado de 10% a 20% de la medida real en superficie al compararse con la toma en una altura mayor; esta situación se genera debido a la influencia del viento, que arrastra o dispersa la lluvia a mayor altura de la boca receptora del instrumento, y por lo tanto, aumentará de acuerdo con la intensidad de viento que se origine en dicha localidad.



- b. Gran parte de las estaciones meteorológicas se encuentran con interferencias de construcciones y árboles en sus alrededores, incidiendo en buena parte y sobretodo en lo que respecta con los parámetros de precipitación, brillo solar y viento, no cumpliendo las normas de ubicación referenciadas y adoptadas de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- c. Se aprecian fallas en la información por parte de observadores, particularmente en la toma de los datos, tal es el caso de acumulados de lluvia, gráficas falsas, ausencia de observador e irregularidad en los horarios de información.
- d. En las estaciones automáticas se observa que los paneles solares no se encuentran debidamente dispuestos en lo que respecta al ángulo de inclinación solar, situándolos con inclinación en sentido este-oeste, cuando la correcta es norte-sur.

Esta anomalía se encuentra en las estaciones Minuto de Dios y Universidad Nacional; entre tanto en el Aeropuerto El Dorado en CATAM, el panel solar se encuentra con un ángulo de inclinación de 45°, el cual no corresponde para la latitud de la estación.

- e. En cuanto al emplazamiento y distribución se refiere y teniendo en cuenta de una parte los principales factores determinantes de la variabilidad de fenómenos, la representatividad del clima y su radio de acción entre otros, se observa que existen estaciones muy cercanas una de otra, permitiendo por lo tanto una duplicidad de condiciones de información de la misma zona, tal es el caso de la Corporación Universitaria Agropecuaria – UDCA – y la Escuela Colombiana de Ingeniería, distantes 1 kilómetro; igualmente se procede con el aeropuerto EL DORADO (CATAM) y Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA) las cuales están en una misma área, cerca de 1.5 kilómetros. Esta situación merece una definición por parte del IDEAM, para optar que se normalice la representación de una estación confiable y definida en la zona.

Para el caso, UDCA y Escuela Colombiana de Ingeniería, se recomienda suspender la segunda, pues allí todo parece indicar que falta un mejor mantenimiento e interés por la información y además por la localización de la estación en cercanías del campo de deportes, hace que permanezca deteriorada en su aspecto físico y aún más la posible ruptura del instrumental de la caseta y demás registradores, el cerramiento se encuentra en malas condiciones, por la entrada de personal a recoger balones. Por lo descrito anteriormente, el estado de la estación no da la suficiente confianza para un buen y aceptable funcionamiento.

Por otra parte el DAMA posee una estación de su red en estas mismas instalaciones, lo cual estaría duplicando información de algunas variables y si bien, podría suministrar el apoyo didáctico o de información si la Escuela lo requiere. No sobra decir, que tanto en la estación del DAMA como la del IDEAM, se aprecian interferencias de árboles y construcciones para el correcto registro del viento, siendo esta última la de mayor afectación.

En lo referente a las estaciones EL DORADO y CEA, esta última realmente no está cumpliendo absolutamente ninguna función de ayuda para los registros de variables para el IDEAM, pues dado su cercanía con la del Aeropuerto no merece bajo ningún aspecto tener un instrumental inactivo y con posibilidad de perderse por falta de mantenimiento y uso.

Si el IDEAM la tiene al servicio de la AEROCIVIL para fines didácticos y es conciente de su utilidad, respeto a su posición; de lo contrario, se recomendaría su levantamiento y la utilización de su

instrumental así como el de las otras estaciones, para que se ubiquen en sitios que realmente ajusten y mejoren la calidad de la red urbana en Bogotá u otras localidades de la Red Básica de IDEAM.

- f. Otro aspecto que se resalta es la conformación en un mismo sitio, de dos y hasta tres estaciones meteorológicas de diferentes instituciones, tal es el caso de:
- Escuela de Ingeniería, donde se encuentra una del IDEAM y una del DAMA.
 - Universidad Antonio Nariño – sede Usme donde se encuentra una del IDEAM y una del FOPAE, y además están instalando una tercera y automática de propiedad del DAMA.
 - Minuto de Dios, instalada recientemente por IDEAM, en el sector de Sierra Morena y aproximadamente a 1 kilómetro de donde se encuentra una estación del FOPAE.
- g. En la estación Universidad Nacional se contempla difícil una continuidad de observación, originando cambios frecuentes de personas, lo cual incide en la toma de datos y la fiabilidad de los mismos. Teniendo en cuenta que se instaló una estación automática, valdría la pena dejar este tipo de información como definitivo de operación para este lugar.

Por lo anterior, sería conveniente no solo en esta estación, sino en todas las de sistema automático, se instale un pluviógrafo de larga duración, a fin de mantener un registro de lluvias el cual permita sostener esta variable y su continuidad, en caso que la estación por alguna circunstancia quedará fuera de servicio.

- h. La estación Alberto Merani, se encuentra actualmente sin observador, sería conveniente su pronta reactivación y puesta en funcionamiento, o un cambio de ubicación, es vital este punto dada su buena representatividad para la zona en que se encuentra localizada.
- i. La estación El Venado de Oro, aunque fue reinstalada recientemente, no presenta una localización que permita ofrecer condiciones de fiabilidad y representación en la toma de datos, pues actualmente se encuentra con incidencias de árboles y edificaciones que afectan directamente las variables de viento y brillo solar. Es conveniente revisar y realizar una evaluación de la fiabilidad de información y localizaciones, a fin de garantizar el funcionamiento y operación normal de esta estación.

3.6.6.1 Proyecto de la red GLOBE del IDEAM

Entre las diversas estaciones visitadas del IDEAM, se tuvo en cuenta las referidas al proyecto GLOBE, instaladas recientemente (al menos 2 o 3 años atrás). Hasta donde se conoce este proyecto es con fines didácticos y de conocimiento sobre asuntos ambientales para la formación de los estudiantes en los diferentes colegios que componen esta red, además está orientado a la difusión, consolidación e intercambios de información meteorológica a nivel local e internacional.

Por lo anterior, si estas estaciones no hacen parte de la red de IDEAM, para ajustes y complemento de la climatología urbana de Bogotá, y por el contrario es solamente con los objetivos de enseñanza para cada colegio y sus necesidades particulares, el autor no tendría objeciones, críticas, ni comentarios por realizar.

Pero en el caso que el IDEAM haya instalado dichas estaciones y esté al frente de un proyecto en que se obtengan resultados, además de suplir con información y ajustar algunos puntos importantes dentro del

aspecto meteorológico y climatológico en el área urbana, el autor tendría obviamente que realizar algunos comentarios con el fin de mejorar aspectos y deficiencias en estos puntos de observación a saber:

- a. En términos generales las estaciones 9 en total : Colegio Nuevo Retiro, Col. Buckingham, Bilbao, E. Duran Dussan, Col. Miguel .A. Caro, Nueva Generación, San Cayetano, San José y Efraín Cañavera, se encuentran con marcadas interferencias como árboles, construcciones de diferentes alturas y en todas las direcciones, lo cual no permite ofrecer la representatividad de los elementos meteorológicos, principalmente en lo que respecta al viento y precipitación, en algunas se marca un ambiente de microclima en la temperatura y humedad, dadas las condiciones de encerramiento a que están expuestas.
- b. Por otra parte, en lo que se refiere con la instalación, se observó que la caseta termométrica no cumple con la norma internacional de orientación, pues en todas las estaciones se encuentra que la puerta de la caseta está orientada hacia el sur, lo cual no es procedente para la zona en el hemisferio norte donde se encuentra localizada, ésta debería ir hacia el norte, tal situación incide en la toma de datos de temperatura sobretodo hacia el mediodía por declinación solar.
- c. En cuanto a su dedicación en la toma de datos, se observó marcada deficiencia por parte de los encargados (alumnos), pues los días sábados, domingos y festivos no se encuentran en los colegios, además la parte más crítica se origina en vacaciones de semana santa, mitad de año y finales, donde prácticamente los alumnos no ingresan al colegio y se pierden dichas series.
- d. No hay presencia ni seguimiento de los objetivos del proyecto por parte del IDEAM a los encargados en cada colegio, según se pudo apreciar en los comentarios realizados por los mismos profesores y alumnos. Esta situación hace decaer la voluntad de los encargados, por ello es importante reactivar los objetivos, proporcionar incentivos, exigir resultados y visitar periódicamente los representantes de cada colegio e involucrar tareas y actividades entre los mismos colegios.
- e. Se resalta la cercanía entre algunas de estas estaciones, tal es el caso de: Buckingham, Miguel A. Caro y Nuevo Retiro pertenecientes al proyecto GLOBE, en el sector norte; y la cercanía entre la estación San José del proyecto GLOBE con la estación Santa María de Usme de la red de Ideam ubicada a menos de 1 kilómetro, al sur de Bogotá. En tanto, se recomienda que las estaciones de Buckingham y Nuevo Retiro, se estudie la posibilidad de reubicarlas en otra zona y puedan así contribuir con más eficiencia en la información de la red, en lo posible en los sitios propuestos de ajuste que se refiere en este documento.
- f. Se observaron acumulados de lluvia en la mayor parte de las estaciones, situación que deja ver la falta de responsabilidad de la toma de información.
- g. Finalmente se analiza que no está lo suficientemente equilibrada y distribuida la pequeña red GLOBE, dado que existe recargo de estaciones por sectores del norte y sur, en cambio no tiene cubrimiento en sectores del centro y occidente del área capitalina; sobre el oriente a pesar de sus ubicaciones con algunas incidencias y falta de representatividad para algunos elementos, se considera que se encuentra relativamente cubierto.

Por lo anterior y si realmente se trata de un proyecto con una red en procura de objetivos y resultados, merece tener en cuenta algunos ajustes a fin de que dicha red sirva de complemento y apoyo para la red básica, constituyendo así una mejor calidad y disposición de información para el IDEAM.

En lo que respecta a las demás estaciones de la red del IDEAM, se encuentran operando en forma aceptable, sus localizaciones están dentro de los parámetros y normas de representatividad. De todos modos con el ánimo de mantener una confiabilidad en la información, vigilancia y cuidado del instrumental,



así como de su operatividad y el buen estado físico de la estación, es conveniente se realicen visitas periódicas al menos cada 3 meses.

Para las estaciones automáticas debería efectuarse chequeos de verificación de variables “in situ”, al menos cada semana, en vista del cuidado de sus sensores, los cuales se alteran con mucha facilidad debido a la exposición de elementos externos del ambiente.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Generales

Basados en el presente estudio se establecen las siguientes recomendaciones y conclusiones para tener en cuenta, dirigidas a optimizar la información hidrometeorológica en el área de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo.

La principal recomendación general es:

“COORDINACIÓN ENTRE INSTITUCIONES CON RED HIDROMETEOROLÓGICA”

Con esta estrecha relación se estará concluyendo lo siguiente:

- Evitar emplazamientos de varias estaciones en un mismo sitio.
- Reducir costos de operación y mantenimiento.
- Unificar criterios y normas en la toma de observaciones.
- Unificar criterios, normas y parámetros para la evaluación de la información.
- Establecer en lo posible un Centro de Información Hidroclimatológica Regional para Bogotá.
- Conformar un banco de datos unificado para Bogotá, con base a la información de todas las estaciones existentes en las redes actuales.
- Producir resúmenes mensuales consolidados de las diferentes variables, fenómenos y eventos significativos para el área de Bogotá o de carácter regional.
- Difundir la información a usuarios en presentaciones de revistas periódicas, prensa, Internet, etc.
- Mejorar las condiciones actuales y aunar esfuerzos para la consolidación y obtención de información confiable para los fines y objetivos de cada institución, para alcanzar los logros, siempre y cuando exista la voluntad y toma de conciencia en cada una de las entidades referidas, por el bien de la comunidad y el de salvar las condiciones ambientales en el área descrita.

5.2 Red Hidrológica

5.2.1 Selección del método de optimización de redes hidrológicas

De las metodologías revisadas se seleccionó la de Karasiov I.F. por las siguientes razones:

- Sus criterios ofrecen una descripción física más cercana a la realidad del proceso hidrológico del área de estudio.



OBJETIVOS GENERALES

Conocer las actuales deficiencias de la red, para aproximarnos a un mejor ajuste y optimización en pleno con las instituciones, a fin de obtener una información hidrometeorológica más acorde, fiable, veraz y actualizada, en procura de un mejor conocimiento de las diferentes variables y regímenes de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo.

Diseñar la ampliación de la red Hidrometeorológica con fines de monitorear y conocer el comportamiento de la precipitación y niveles de agua conducentes al pronóstico de estas variables, con el fin de emitir avisos de prevención y alertas tempranas en área de la ciudad y cuenca del río Tunjuelo.

1. PERSONAL PARTICIPANTE

IDEAM

Subdirección de Meteorología:

- Maximiliano Henríquez – Subdirector de Meteorología
- Hugo Saavedra – Ingeniero Geógrafo (Funcionario)
- Germán H. Bernal García – Meteorólogo (Contratista)

Subdirección de Hidrología:

- Hebert Gonzalo Rivera – Subdirector de Hidrología
- Eduardo Zamudio – Hidrólogo (Funcionario)
- Efraín Domínguez – Hidrólogo (Funcionario)
- María Constanza Rosero Mesa – Ingeniera Civil (Contratista)

Programa de Operación de Redes:

- Xiomara Sanclemente – Jefe del Programa de Operación de Redes
- Eduardo Esparza – Coordinador de Automatización
- Edgar Blanco – Coordinador del Área Operativa 11
- Ricardo Castellanos – Administrador de Proyecto (Contratista)
- Martha Cadena – Ingeniera Geógrafa (Contratista)
- Jorge Eliécer Moya – Ingeniero Eléctrico (Contratista)

FOPAE

Subdirección de Investigación y Desarrollo

- Guillermo Ávila Álvarez – Subdirector Investigación y Desarrollo
- Diana Arévalo – Coordinadora Grupo de Estudios Técnicos y Conceptos
- Carolina Rogelis – I.C., MsC. (Contratista)
- Jorge Rosas – I.C., MIng. R.H. (Contratista)



así como de su operatividad y el buen estado físico de la estación, es conveniente se realicen visitas periódicas al menos cada 3 meses.

Para las estaciones automáticas debería efectuarse chequeos de verificación de variables “in situ”, al menos cada semana, en vista del cuidado de sus sensores, los cuales se alteran con mucha facilidad debido a la exposición de elementos externos del ambiente.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Generales

Basados en el presente estudio se establecen las siguientes recomendaciones y conclusiones para tener en cuenta, dirigidas a optimizar la información hidrometeorológica en el área de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo.

La principal recomendación general es:

“COORDINACIÓN ENTRE INSTITUCIONES CON RED HIDROMETEOROLÓGICA”

Con esta estrecha relación se estará concluyendo lo siguiente:

- Evitar emplazamientos de varias estaciones en un mismo sitio.
- Reducir costos de operación y mantenimiento.
- Unificar criterios y normas en la toma de observaciones.
- Unificar criterios, normas y parámetros para la evaluación de la información.
- Establecer en lo posible un Centro de Información Hidroclimatológica Regional para Bogotá.
- Conformar un banco de datos unificado para Bogotá, con base a la información de todas las estaciones existentes en las redes actuales.
- Producir resúmenes mensuales consolidados de las diferentes variables, fenómenos y eventos significativos para el área de Bogotá o de carácter regional.
- Difundir la información a usuarios en presentaciones de revistas periódicas, prensa, Internet, etc.
- Mejorar las condiciones actuales y aunar esfuerzos para la consolidación y obtención de información confiable para los fines y objetivos de cada institución, para alcanzar los logros, siempre y cuando exista la voluntad y toma de conciencia en cada una de las entidades referidas, por el bien de la comunidad y el de salvar las condiciones ambientales en el área descrita.

5.2 Red Hidrológica

5.2.1 Selección del método de optimización de redes hidrológicas

De las metodologías revisadas se seleccionó la de Karasiov I.F. por las siguientes razones:

- Sus criterios ofrecen una descripción física más cercana a la realidad del proceso hidrológico del área de estudio.

- Es un método versátil siendo viable considerar diferentes escenarios hidrológicos de una misma área de estudio, ya que el método tiene como variable de entrada la escorrentía; la cual implícitamente puede caracterizar un evento hidrológico propio de la cuenca, tales como: las condiciones promedio, eventos máximos o si es el caso los eventos mínimos.
- Este método es el resultado de la integración de diversos criterios desarrollados por diferentes autores, lo cual no limita el método a un único criterio de evaluación de la red tal como sucede con métodos simplificados, como los propuestos por la OMM.
- Los criterios del método tiene en cuentas variables de entrada como: el error de la tecnología de medición, el nivel de homogeneidad del área de estudio, entre otros, que no son tenidos en cuenta en otros métodos y como se puede apreciar a lo largo del informe, dichas variables tiene un peso importante al momento de definir el diseño de la red.
- El método utilizado para el diseño de la red hidrológica no depende de la precipitación evitando sesgar el diseño a un modelo básico de lluvia – escorrentía. En el sector del Distrito Capital, emplear un método de optimización que dependa básicamente de la precipitación no es lo más óptimo, debido al grado de incertidumbre que aportara esta variable a este tipo de métodos. Dicha incertidumbre esta asociada a las anomalías que se presentan en la mayoría de sus cuencas, que las alejan del régimen natural y que se evidencia en los bajos valores de correlación.
- La calidad de la información hidrológica, la homogeneidad en los métodos de medición juegan un papel preponderante en los resultados arrojados por el método de optimización. Por ello, la efectividad de los resultados arrojados por el método es proporcional a la confiabilidad y calidad de la información. En el caso del Distrito Capital la información hidrológica es escasa y presenta vacíos a lo largo de las series históricas, limitando así la efectividad de éste y cualquier otro método de optimización.
- El método estudió el campo del caudal máximo representado como una función $f(\xi, C_v, gradY, r(l), \sigma)$.

5.2.2 Optimización de la red

El número total de estaciones que arrojó el rediseño para el Distrito Capital es de 41, de las cuales:

- El número recomendado de estaciones de referencia general es 20, distribuidas así: 6 en la cuenca del río Tunjuelo, 6 en la cuenca del río Fucha, 1 en la cuenca de río Juan Amarillo, 1 en la cuenca del Humedal Guaymaral, 1 en el humedal Jaboque y 1 en el canal Cundinamarca y 4 en el río Bogotá.
- El número recomendado de estaciones de referencia específica es 21, distribuidas así: 5 en la cuenca del río Tunjuelo, 4 en la cuenca del río Fucha, 8 en la cuenca de río Juan Amarillo y 4 en la cuenca del Humedal Guaymaral.
- El número recomendado de estaciones para corrientes pequeñas de interés prioritario oscila entre 6 a 11, cuyo valor exacto será definido por FOPAE.



La red de estaciones hidrológicas con fines de pronóstico de niveles para emisión de alertas por inundación debe contar como mínimo con la red de referencia general de carácter telemétrico. Para mayor resolución en la información ha de contar con las estaciones de referencia específica y las de pequeñas corrientes de interés prioritarias.

Las anomalías a nivel hidrológico que presentan la cuencas que componen el área de estudio limita el uso de modelos básicos lluvia – escorrentía, tal como lo muestran los bajos coeficiente de correlación obtenido entre dichas variables. Por tanto, la distribución de red hidrológica propuesta pretende proporcionar la información hidrométrica suficiente para monitorear y en un futuro reproducir o pronosticar el paso de una onda de creciente a lo largo de las corrientes principales, reduciendo al máximo la dependencia del uso de información climatológica para tales análisis.

La localización definitiva de las estaciones debe ir de la mano de visitas de campo que permitan verificar la factibilidad e importancia del punto de monitoreo. En especial para la red de estaciones de referencia específica, ya que el diseño de esta red está sujeto a la veracidad y al nivel de detalle de la hidrografía al que se tiene acceso, y que para este caso variaba de densa a menos comenzando por los cerros orientales, luego la cuenca del río Tunjuelo y finalmente la zona urbana del Distrito Capital.

5.3 Red Meteorológica

5.3.1 Selección del método de optimización de redes meteorológicas

Una vez analizados los diferentes métodos para el ajuste y optimización de redes meteorológicas, se concluyó que la mayoría de ellos analizan para el caso de latitudes medias y altas; sin embargo L. S. Gandin en su nota técnica No. 111 establece algunos criterios que ayudan a definir unos tópicos para la parte tropical, sobre todo en lo que respecta a condiciones de representatividad, principalmente en regiones con relieve significativo y sistemas influenciados por cambios rápidos y discontinuos en las condiciones meteorológicas.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta los diferentes documentos de la OMM en cuanto a sus recomendaciones para la optimización de redes meteorológicas, se concluyó que lo más recomendable es asumir los criterios de diseño y normas adaptables para los efectos de rediseño de la red, aunados con las revisiones periódicas en cuanto a su operación y representatividad de los análisis de las diferentes variables, en especial de precipitación.

5.3.2 Recomendaciones generales para FOPAE

En vista que FOPAE en un futuro inmediato y dadas las pretensiones de incluir dentro de sus actividades y ajustes de programas, la producción y elaboración de boletines y avisos sobre el comportamiento y distribución de lluvias en Bogotá y su entorno, además de proyectos y actividades con eventos significativos de control relacionados con la parte natural, se hace necesario mejorar la cobertura y ajustar la red en tiempo real para la zona urbana.

Por lo anterior, y no obstante que algunos puntos de los propuestos no fueron adaptados en esta etapa, es recomendable dejar abierta la posibilidad de sitios estratégicos no sólo para la parte meteorológica en tiempo real, sino para ajustar en un futuro la red y cerrar la cobertura en el área de Bogotá, por tal razón se dejan las siguientes propuestas (Mapa 35. Red meteorológica óptima FOPAE)



1. Sector de Fontibón, cercana a la desembocadura del río Fucha en el río Bogotá.
2. Sector de la confluencia del río Juan Amarillo y Bogotá.
3. La posibilidad de ubicar una estación en la Sede Principal de FOPAE, no solo para complementar la cobertura de la red y su ajuste de representatividad de lluvias en la zona, sino para constituir una identificación de la institución como Centro de Operaciones y Control de Prevención y Atención de Emergencias en la ciudad de Bogotá.
4. Igualmente realizar el seguimiento regular de operación y control de las diferentes estaciones, así se estará garantizando la buena calidad de información por una parte y por otra el buen funcionamiento de los equipos, además de la buena representatividad del sector.
5. La precipitación es una variable muy significativa y de gran cuidado dentro del aspecto meteorológico y ambiental, originando desastres para la población tanto rural como urbana, dando como resultado inundaciones, anegaciones de áreas, remoción de masas, etc.; sin embargo, existe otra variable bastante significativa y que no se tiene en cuenta, posiblemente por la poca ocurrencia que se tiene en la zona, el viento, pero valdría la pena en un futuro la adaptación de sensores para este elemento, en sectores factibles de desencadenar flujos dinámicos muy fuertes, dando lugar a posibles afectaciones y desastres a la población, ambiente y estructuras físicas en el área urbana.

5.3.3 Recomendaciones generales para IDEAM

Dado que el IDEAM es la institución encargada de normalizar y reglamentar todo lo concerniente con la parte de Meteorología en el país, es consecuente realizar los respectivos ajustes de las redes meteorológicas locales, en este caso, programas aplicados de redes, además de proyectos y actividades con eventos significativos de control, a fin de mejorar la cobertura y ajustar la red en tiempo real para la zona urbana.

Por lo anterior y no obstante que algunos puntos de los propuestos no fueron adaptados en esta etapa, es recomendable dejar abierta la posibilidad de sitios estratégicos no sólo para la parte meteorológica en tiempo real, sino para ajustar en un futuro la red y cerrar la cobertura en el área de Bogotá.

Además el IDEAM como autoridad meteorológica deberá impartir las normas, procedimientos y estrategias en los diferentes aspectos operativos y sistemas de información, desde la operatividad de las estaciones y toma de información, hasta el cálculo y establecimiento de un Banco de Datos para la Información Meteorológica.

Por lo tanto, deberá constituirse en el coordinador de las instituciones que poseen redes meteorológicas, mediante la realización de talleres, seminarios, etc., los cuales ayudarán a mantener un control en el ámbito meteorológico y más concretamente en el área de Bogotá, a fin de aunar esfuerzos por consolidar y obtener mejor resultados en la confiabilidad de la información regional y nacional.



BIBLIOGRAFÍA

Archivos sobre inundaciones – MAXIMILIANO HENRIQUEZ DAZA.

Desastres de Origen Natural en Colombia.1979-2004. Michel Hermelin .Julio 2005.

DOMÍNGUEZ E. et al, 2005: Criterios de optimización de Karaziov aplicados a la red hidrológica colombiana – Número 13, 22 Págs. Medellín.

PEREZ, E. G., “Diseño de redes hidrometeorológicas aplicación a la cuenca del río Cauca”. COPANARNH. Venezuela. 1980.

IDEAM, “Optimización de la Red Hidrológica Nacional de referencia”. Santa Fe Bogotá. 2002.

IDEAM, “Metodología para la optimización de redes hidrométricas. Caso de estudio – área operativa 10”. Santa Fe Bogotá. 2000.

IDEAM-CRQ. “Diagnóstico de la Red Hidrométrica de la Corporación Autónoma Regional del Quindío”. Santa Fe de Bogotá. 2000. Santa Fe de Bogotá.

IDEAM-FOPAE, “Informe de Compilación y Análisis de Información”. Convenio interinstitucional 198/04. 2006. Bogotá D.C.

IDEAM-FOPAE, “Proyecto red de alertas hidrometeorológicas para inundaciones y fenómenos de remoción en masa en el suroriente de Santa Fe de Bogotá, Diseño de la Red de Alertas. Convenio especial de cooperación N° 017/1998CO. Febrero 2000.

INGETEC S.A, “Zonificación de riesgos por inundación en las localidades de Tunjuelo y Ciudad Bolívar”. Santa Fe de Bogotá, Feb.1999.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM. “Nota Técnica y Proyectos de Organización de la Red Meteorológica de Colombia”. Juan López de Rego.- 1970.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM. “Guide to Hidrometeorological Practices”. WMO-N° 168.TP.82, 1970.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM. “The Planning of Meteorological Station Networks”.N°265 .TP 149. L.S. GANDIN.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM “Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites”. TIM R. OKE, Canada. University of British Columbia, Vancouver, B.C. Canada V6T 1Z2 WMO/TD N° 1250 . 2004.

RIVERA H, “El Monitoreo ambiental en la República de Colombia con énfasis en hidrología”, 1999.

www.sire.gov.co Sistema de información para la Gestión de Riesgos y Atención de Emergencias de Bogotá FOPAE-SIRE.

STANESCU, S. “Apuntes de clase para el curso de hidrología práctica (Parte I)”. Servicio Colombiana de meteorología e hidrología – SCM.H. Bogotá, Colombia. 1974.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, OMM “Guía de practicas hidrológicas adquisición y procesa de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones”. OMM No. 168. 1994.

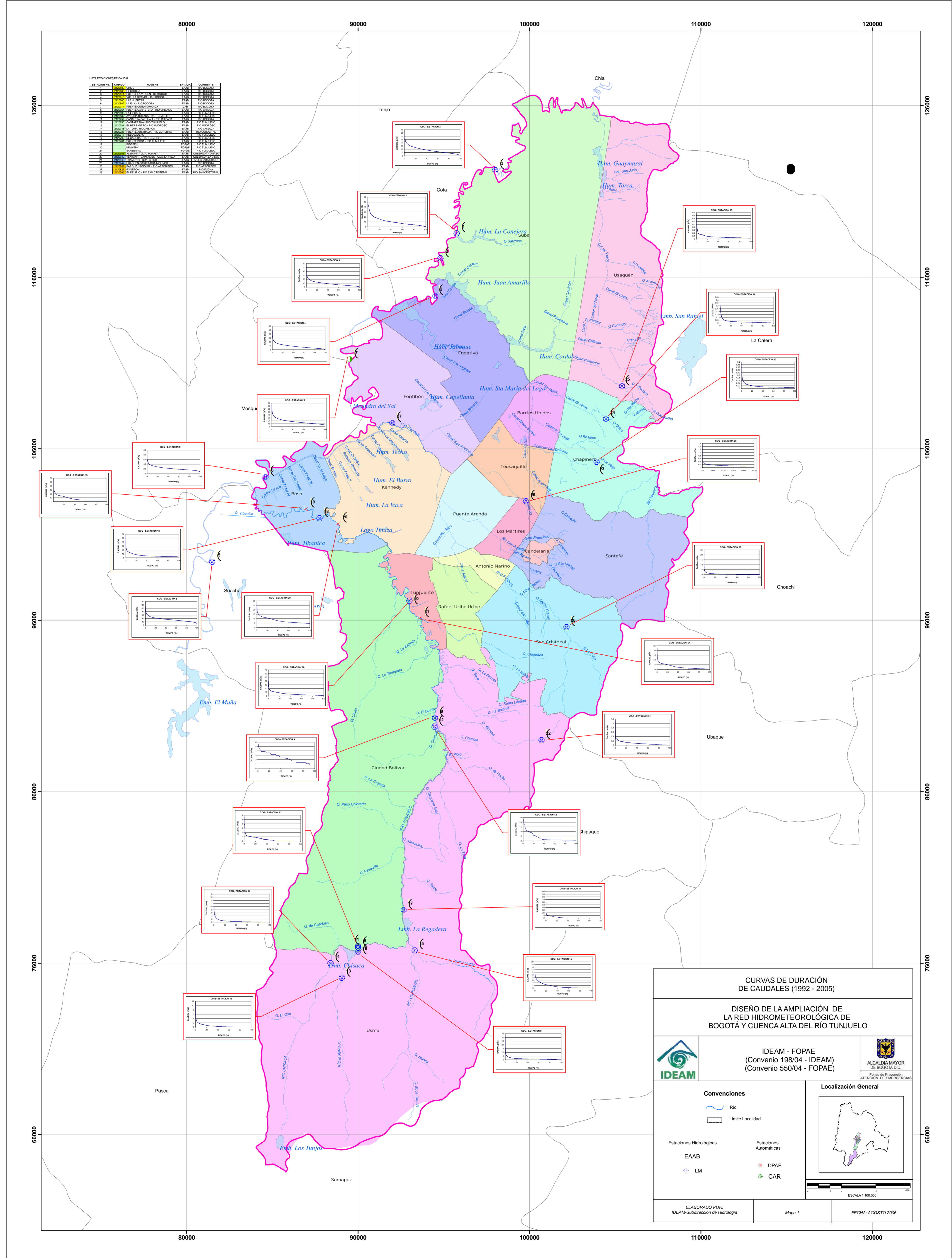


INSTITUTO COLOMBIANO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ADECUACIÓN DE TIERRAS – HIMAT.
“Apuntes Métodos de medición y procesamiento de la información hidrometeorológica”. Bogotá, Colombia.
1982.

STANESCU, S. “Instrucciones de procesamiento y análisis críticos de la calidad de los datos hidrométricos para su publicación en anuarios hidrológicos”. Servicio Colombiana de meteorología e hidrología – SCMH.
Bogotá, Colombia. 1970.


LISTA ESTACIONES DE CAUDAL

ESTACION	CODIGO	NOMBRE	REY	CORRIENTE
1	001	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
2	002	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
3	003	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
4	004	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
5	005	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
6	006	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
7	007	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
8	008	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
9	009	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
10	010	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
11	011	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
12	012	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
13	013	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
14	014	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
15	015	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
16	016	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
17	017	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
18	018	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
19	019	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
20	020	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
21	021	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
22	022	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
23	023	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
24	024	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
25	025	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
26	026	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
27	027	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
28	028	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
29	029	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
30	030	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
31	031	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
32	032	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
33	033	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
34	034	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
35	035	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
36	036	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
37	037	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
38	038	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
39	039	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
40	040	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
41	041	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
42	042	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
43	043	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
44	044	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
45	045	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
46	046	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
47	047	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
48	048	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
49	049	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
50	050	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
51	051	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
52	052	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
53	053	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
54	054	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
55	055	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
56	056	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
57	057	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
58	058	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
59	059	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
60	060	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
61	061	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
62	062	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
63	063	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
64	064	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
65	065	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
66	066	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
67	067	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
68	068	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
69	069	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
70	070	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
71	071	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
72	072	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
73	073	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
74	074	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
75	075	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
76	076	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
77	077	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
78	078	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
79	079	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
80	080	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
81	081	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
82	082	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
83	083	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
84	084	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
85	085	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
86	086	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
87	087	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
88	088	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
89	089	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
90	090	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
91	091	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
92	092	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
93	093	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
94	094	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
95	095	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
96	096	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
97	097	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
98	098	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
99	099	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ
100	100	LA CONCEJERA	120	BOGOTÁ




CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES (1992 - 2005)

DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO



IDEAM - FOPAE
(Convenio 198/04 - IDEAM)
(Convenio 550/04 - FOPAE)

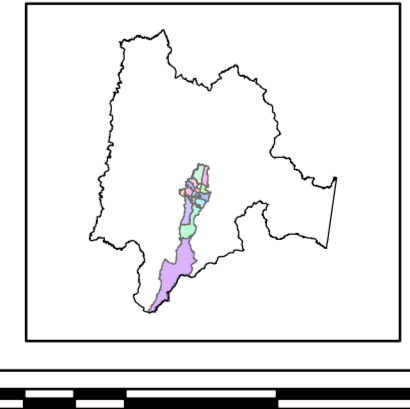


ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
Fondo de Prevención de EMERGENCIAS

Convenciones

- Río
- Límite Localidad
- Estaciones Hidrológicas
- EAAB
- LM
- Estaciones Automáticas
- DPAE
- CAR

Localización General



ESCALA 1:100.000

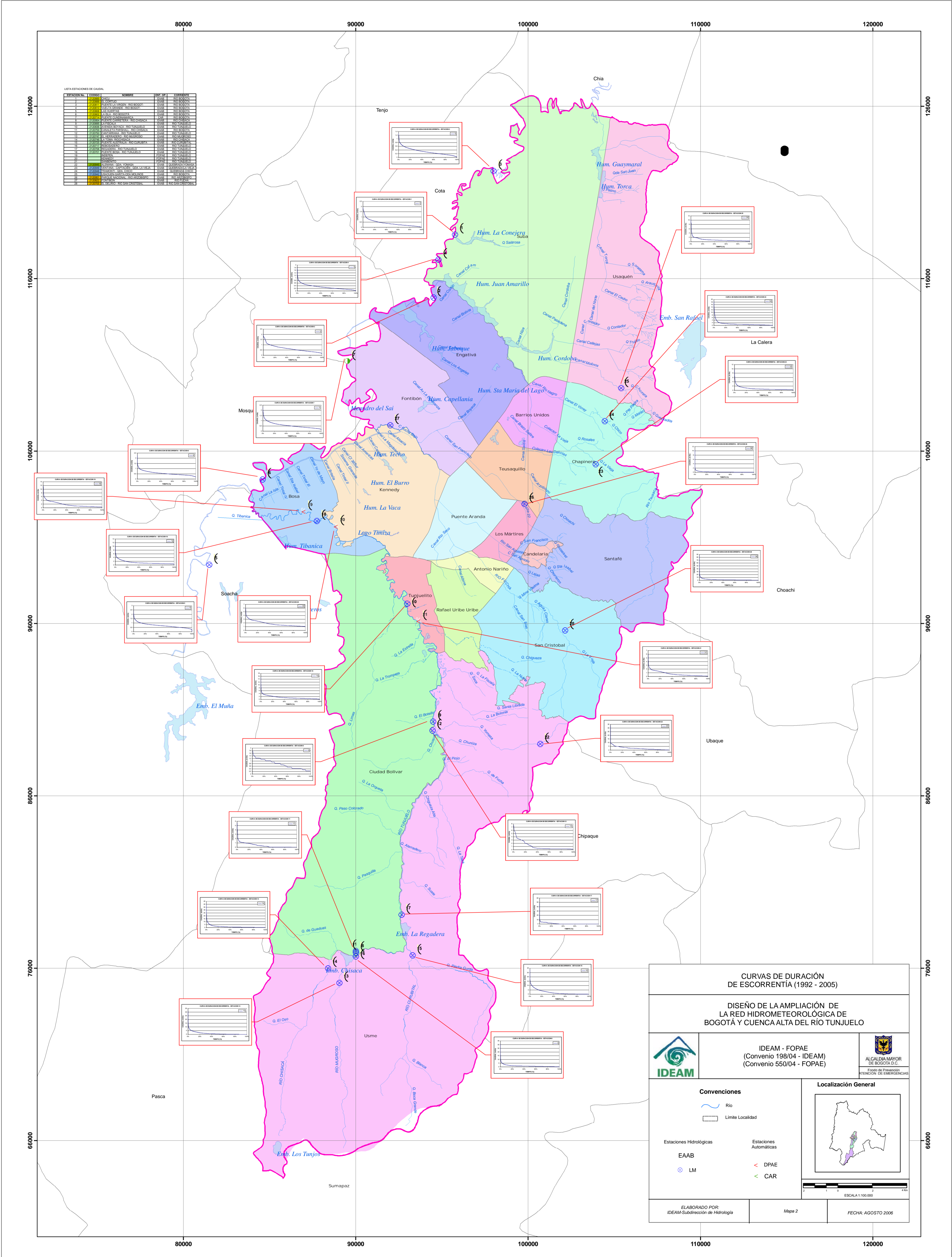
ELABORADO POR:
IDEAM-Subdirección de Hidrología

Mapa 1

FECHA: AGOSTO 2006


LISTA ESTACIONES DE CAUDALES

ESTACION	TIPO	NOMBRE	ENT. SPA	CONTENIDO
1	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
2	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
3	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
4	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
5	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
6	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
7	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
8	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
9	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
10	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
11	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
12	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
13	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
14	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
15	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
16	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
17	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
18	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
19	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
20	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
21	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
22	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
23	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
24	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
25	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
26	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
27	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
28	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
29	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
30	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
31	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
32	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
33	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
34	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
35	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
36	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
37	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
38	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
39	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
40	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
41	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
42	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
43	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
44	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
45	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
46	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
47	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
48	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
49	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
50	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
51	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
52	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
53	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
54	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
55	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
56	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
57	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
58	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
59	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
60	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
61	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
62	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
63	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
64	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
65	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
66	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
67	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
68	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
69	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
70	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
71	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
72	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
73	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
74	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
75	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
76	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
77	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
78	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
79	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
80	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
81	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
82	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
83	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
84	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
85	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
86	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
87	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
88	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
89	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
90	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
91	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
92	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
93	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
94	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
95	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
96	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
97	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
98	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
99	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ
100	EAAB	LA CALERA	BOGOTÁ	BOGOTÁ




CURVAS DE DURACIÓN DE ESCORRENTÍA (1992 - 2005)

DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA DE BOGOTÁ Y CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO



IDEAM

IDEAM - FOPAE
(Convenio 198/04 - IDEAM)
(Convenio 550/04 - FOPAE)

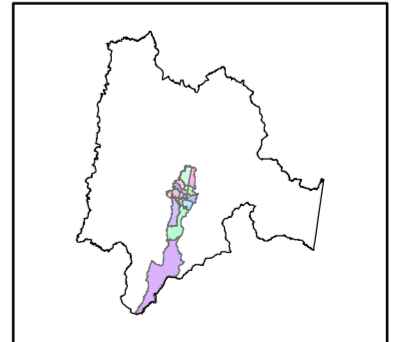


ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
Fondo de Planeación
ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

Convenciones

- Río
- Limite Localidad
- Estaciones Hidrológicas EAAB
- Estaciones Automáticas
- LM
- DPAE
- CAR

Localización General



ESCALA 1:100.000

ELABORADO POR:
IDEAM-Subdirección de Hidrología

Mapa 2

FECHA: AGOSTO 2006