

APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE KARASIOV A LA RED HIDROLÓGICA COLOMBIANA

Efraín A. Domínguez C., Raúl Niño R. & Nelsy Verdugo R.
Grupo de Investigación en Hidrología
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, Bogotá
edc@ideam.gov.co, rninor@yandex.ru, nelsyv@ideam.gov.co

Recibido para evaluación: 13 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 08 de Julio de 2006

RESUMEN

El presente trabajo muestra la aplicación de los criterios de optimización de Karasiov a la red hidrológica Colombiana. Como resultado se ofrece una comparación objetiva sobre las diferencias entre la red hidrológica real y la óptima. En la introducción y antecedentes se presenta un breve relato sobre la evolución de la red y se discuten los pasos necesarios para el diseño óptimo de una red hidrometeorológica.

PALABRAS CLAVES: Optimización de Redes, Redes de Monitoreo, Red Hidrometeorologica, Colombia, Diseño de Redes.

ABSTRACT

This paper shows an application of Karasiov's optimization criterions to Colombian hydrological network. As the main result an objective comparison between real and optimal networks is provided. An short historical review of network development is presented. Main steps for hydrometeorological network design are touched upon.

KEY WORDS: Network Optimization, Network Monitoring, Hydrometeorological Network, Colombia, Design Network.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento continuo de las variables hidrometeorológicas es mandatorio en todas las instancias de planificación para la gestión sostenible de los recursos naturales. Sin embargo, la estructuración y materialización de los sistemas de monitoreo hidrológico en nodos físicos de observación, en la mayoría de los países, han carecido de las debidas etapas iniciales de diseño y proyección óptima del programa de mediciones, de su infraestructura y finalmente de su aparato protocolario. Adicionalmente la operatividad de los sistemas de monitoreo en condiciones socioeconómicas específicas rara vez ha sido considerada como limitante en las etapas de implementación inicial de los mismos. Los factores antes mencionados no han sido ignorados adrede, ni por efectos de un desconocimiento conceptual del diseño de sistemas de monitoreo (de cualquier orientación), sino debido a la presión coyuntural de las premisas del paradigma socioeconómico en Europa, URSS y EEUU durante el periodo dorado de 1950 a 1973 y a la expansión agrícola e hidroenergética en América Latina. Debido a esto, los sistemas de monitoreo hidrometeorológicos fueron concebidos, inicialmente, con el fin de satisfacer necesidades particulares de distintos sectores (militar, aeronáutico, agroindustrial, energético, etc.) y sin tomar como base una visión integral como estrategia para el seguimiento de variables hidrometeorológicas que en la naturaleza se encuentran interrelacionadas per se y las cuales durante el diseño de los sistemas de monitoreo fueron analizadas como variables independientes. Esto dio lugar al surgimiento de redes aisladas de monitoreo, con defectos de traslape y discontinuidades espaciotemporales de muestreo. En la mayoría de los casos la fusión de varias redes aisladas, en un sólo sistema de monitoreo no produjo la red de observación idónea para la evaluación, caracterización y proyección de las variables de estado de los procesos hidrometeorológicos, por el contrario se consolidaron sistemas de monitoreo muy costosos y poco eficientes que terminaron por convertirse en un lastre para los presupuestos nacionales.

En los países de economías saludables y fortalecidas, la situación anterior condujo a la formalización de los procesos de optimización de redes logradas a través de la unión arbitraria de las mencionadas redes aisladas. Es apreciable la cantidad de innovaciones técnicas y la claridad científica con la que este proceso fue adelantado

en países científicamente adelantados (URSS, Canadá y EEUU) en algunos de los cuales hasta hoy se adelantan procesos de modernización continua (NOAA, 1999). Cabe aclarar que las metodologías aplicadas en cada uno de estos países fueron consolidadas de manera independiente y tomando como base los modelos conceptuales viables en cada país de acuerdo con sus capacidades socioeconómicas y culturales. Como un ejemplo de esta aseveración se puede confrontar los principios básicos de optimización de la red hidrológica planteados por los científicos de Rusia y Estados Unidos los cuales fueron diseñados partiendo de las condiciones socio-culturales y del entorno económico de cada país. Es así como en Estados Unidos la red es optimizada con base en la eliminación de puntos de monitoreo redundantes, mediante la aplicación del método NAUGLS (Rodda, 1980), mientras que en la URSS se optimizó con base en la representatividad del muestreo, obteniendo el número óptimo de estaciones a través de la noción de campo hidrometeorológico y tomando en cuenta el nivel de incertidumbre de las mediciones del mismo.

En los países de economías débiles, el sostenimiento de redes nacionales, formadas por la unión de las redes aisladas preexistentes, en muchos casos produjo la desarticulación de las mismas y a la desaparición del concepto de “sistema nacional de monitoreo centralizado”. En este sentido Colombia es uno de los pocos países Latino Americanos que cuenta con una institución gubernamental que sostiene la producción, tratamiento y análisis de información hidroclimática a través de la operación de una red hidrometeorológica de carácter nacional, la cual mediante la aplicación de un estándar protocolario oficial garantiza la homogeneidad de la información (desde el punto de vista metrológico) y la posibilidad de establecer el error característico para la representación de los distintos campos hidroclimáticos¹.

El establecimiento del sistema de monitoreo hidrológico de Colombia está ligado al desarrollo agroindustrial, hidroenergético y de prestación de servicios básicos (acueducto, alcantarillado). Algunos autores, estudiosos

1 Aunque en realidad la evaluación del error de representación de los campos hidrometeorológicos aún no ha sido realizada, existen solo aproximaciones puntuales de los errores de monitoreo de algunas variables hidroclimáticas

del tema (Pabón, García y Collantes: 1997), coinciden en caracterizar la formación y crecimiento de la red de monitoreo hidrometeorológico colombiana como “un tanto aleatorio” desde el punto de vista de una Red Básica Nacional. De acuerdo con los mismos autores, fue en 1969, con la organización del Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología (SCMH), que se inició el proceso de establecer en forma sistemática una red hidrometeorológica óptima partiendo del diseño de una red mínima básica². Sin embargo, el crecimiento de la red continuó ligado a las necesidades específicas de los polos de desarrollo del país. En 1976, en una reestructuración del sector agrícola colombiano, la red hidrometeorológica pasó a ser operada por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT). De este modo, sin dejar de atender a otros sectores productivos, el sistema de monitoreo se enfatiza en las necesidades del Sector Agrícola Nacional (Pabón, García y Collantes: 1997). En los periodos del SCMH y del HIMAT, el sistema de monitoreo nacional se fortaleció principalmente en sus componentes hidrometeorológicos. En 1993, por medio de la ley 99 se creó al Ministerio del Medio Ambiente y los institutos de investigación, entre ellos el IDEAM, al cual se le asigna como función: obtener, almacenar, estudiar, procesar y divulgar la información científica básica sobre hidrología, meteorología, hidrogeología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal con el fin de soportar los procesos de toma de decisiones para el desarrollo sostenible del país. En ese ámbito, el IDEAM debe, no sólo asimilar la red hidrometeorológica del HIMAT sino también estructurarla para constituir un sistema de monitoreo integral capaz de responder a las funciones otorgadas al IDEAM. La aparición de nuevos elementos de monitoreo, sin contar con las debidas asignaciones de recursos económicos, produjo una reducción significativa de los porcentajes del total efectivo de recursos para cada componente, agravando, sustancialmente, la salud de los módulos de monitoreo hidrológico y meteorológico. Paralelamente las condiciones de orden público del país también influyen en la calidad de operación del sistema de monitoreo. Aparece por ello la necesidad de fortalecer los procesos de optimización de los nodos de monitoreo

hidrometeorológicos. Es en este marco que desde la creación del IDEAM se adelantan evaluaciones técnicas destinadas a detectar las estaciones de bajo rendimiento dentro de la red de referencia del IDEAM. También se emprendió la formulación de criterios objetivos para la evaluación y diseño óptimo de redes hidrológicas nacionales (Domínguez: 2000; García: 1999; Domínguez y Niño: 1998), los cuales se han implementado regional y localmente con el consecuente perfeccionamiento metodológico para la evaluación de la red hidrológica básica nacional, cuya aplicación y resultados son divulgados mediante el presente Artículo.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Los fenómenos hidrometeorológicos se estudian mediante el análisis de las series de datos obtenidas en sitios o estaciones de medición distribuidos en el área de estudio y con un programa de muestreo temporal definido. La configuración integrada de los puntos de medición, el instrumental, los protocolos, los estándares de medición, la frecuencia de muestreo, el equipo técnico y 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 las cuales se desarrolla la gestión orientada a la obtención de información hidrometeorológica.

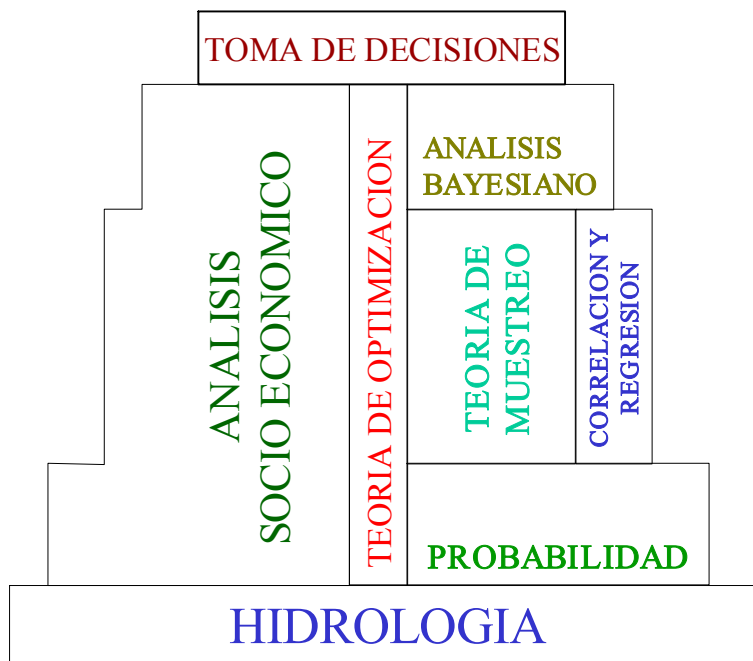
El tema de diseño y optimización de redes hidrométricas debe incorporar de manera sistemática los aspectos técnicos, las condiciones del entorno físico, los procesos socio - económicos y los elementos culturales predominantes en el dominio geográfico donde se debe realizar el seguimiento hidrometeorológico.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

- ¿Cuál es el objetivo de la red? ;
- ¿Qué variables se deben observar? ;
- ¿Dónde se deben observar las variables definidas? ;
- ¿Cómo debe ser el programa de observaciones? ;
- ¿Cuan exactas deben ser las mediciones? ;
- ¿Por cuánto tiempo debe operar 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?

² Aplicando algunos criterios básicos como los formulados por la OMM

Este juego de preguntas, que aparenta ser sencillo, es la clave para el desarrollo del diseño de la red. Aún cuando este conjunto de preguntas parece completo, sólo refleja los elementos que el técnico desea ver reflejados en una red óptima y no cubre los aspectos económicos³ que fundamentan la necesidad, viabilidad y sustentabilidad de cualquier sistema de monitoreo soportado por una comunidad o grupo social.

Los factores antes mencionados permiten formular el diseño de la red hidrológica como una pirámide en la cual interactúan los elementos necesarios para obtener la red de observaciones que permita cumplir los objetivos planteados, con la disponibilidad económica y en el entorno social existentes (Moss, 1982). Estos planteamientos entrelazan los componentes del diseño de la red en una pirámide del siguiente tipo (Véase Figura 1).



Tomado de la WMO. Modificado 2000

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

Como se observa, la base de la infraestructura 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).

3. DENSIDAD ESPACIAL OPTIMA – MÉTODO DE KARASIOV MODIFICADO

3.1. Clasificación de la red

No existe una clasificación estándar de las redes, éstas se clasifican siguiendo diversos criterios, ya sea de acuerdo al periodo de operación, al tipo de parámetros observados o al uso que se le darán a los datos.

3. Especialmente aquellos afines con la relación costo beneficio del soporte estructurado de una red hidrometeorológica

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, esto quiere decir que según la finalidad misma de la red las estaciones se pueden clasificar en:

a) 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.

b) 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 mas 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 nacional la red hidrométrica debe contener los dos tipos de estaciones. Sin embargo en este documento se hace énfasis en el análisis de la configuración óptima de la red de régimen general y no se abordan los aspectos sobre la financiación de cada tipo de red.

3.2. Formulación de criterios para estaciones de régimen general

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 hidroclimática y su relación con los factores físico geográficos, para ello Karasiov (1968 y 1972) propone los siguientes criterios:

3.2.1. Criterio del gradiente

Al fijar una red de referencia se cuenta con una 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 escorrentía, 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 escorrentía.

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 centroides) debe ser:

$$\Delta Y(l) = l \text{grad}(Y) \geq 2\sigma \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{C_v}{\sqrt{N}} \tag{2}$$

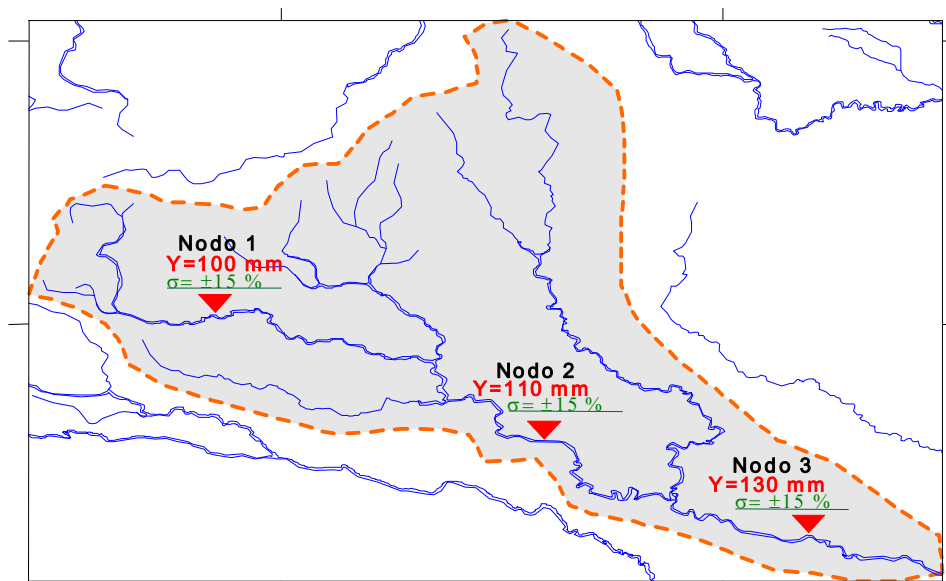


Figura 2. Explicación del criterio del gradiente

Donde:

N : Número de observaciones.

Cv : Coeficiente de variación.

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene que el área de gradiente es (Karasirov, 1968 y 1972):

$$A_{grad} \geq \frac{8\sigma^2 Y_0^2}{(grad(Y))^2} \quad (3)$$

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:

$$\nabla(Y) = \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Y}{\partial z} \quad (4)$$

Una versión bidimensional del operador de gradiente esta implementada en el paquete de generación de superficies Surfer for Windows (Golden Software, 1995). Este programa presenta un esquema de diferencias finitas de cinco puntos para la versión bidimensional de la ecuación

(4). Aplicando este operador al campo que de escorrentía anual se obtiene una grilla de gradiente que caracteriza la intensidad de cambio de esta en el espacio.

3.2.2. 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.

El criterio correlativo se apoya en la función de autocorrelación espacial (véase Figura 3), de la cual se obtiene el radio correlativo “ l_c ” 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 distanciados por la distancia l_c

Teniendo en cuenta esos dos factores la expresión para el cálculo del área correlativa es la siguiente (Karasirov, 1968 y 1972):

$$A_{correlativa} \leq \frac{\sigma^4}{a^2 C_v^4} \quad (5)$$

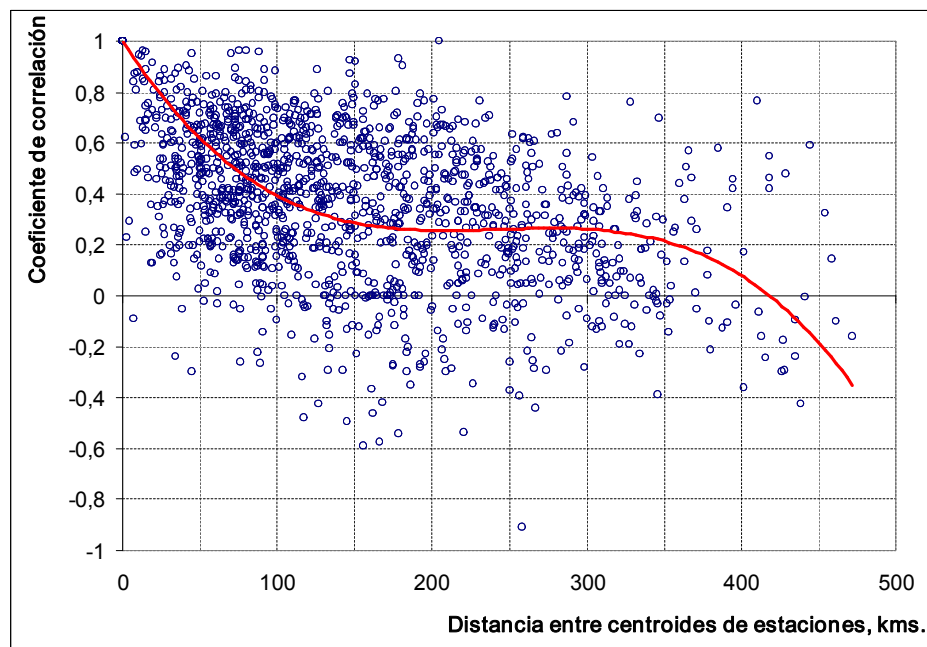


Figura 3. Función de autocorrelación espacial de la escorrentía anual

Donde:

$A_{\text{correlativa}}$: Área correlativa, después de la cual se pierde la conexión estadística entre estaciones.

Cv : Coeficiente de variación de “ Y ” (espacial).

A su vez:

$$a = \frac{1}{l_0} \quad (6)$$

3.2.3. Criterio de representatividad

Las estaciones de régimen general se ocupan del seguimiento de variables que dependen solo del régimen hidrológico 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 lamina 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 $0 < A \leq A'_{\text{min}}$ presenta comportamientos muy diversos asociados a hidrologías locales, mientras que en el dominio $A'_{\text{max}} < A < \infty$ 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 está influenciada por factores climáticos de diversas regiones.

La escorrentía registrada en el dominio $A'_{\text{min}} < A \leq A'_{\text{max}}$ es aquella cuyo régimen está definido principalmente por los factores hidrológicos 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}

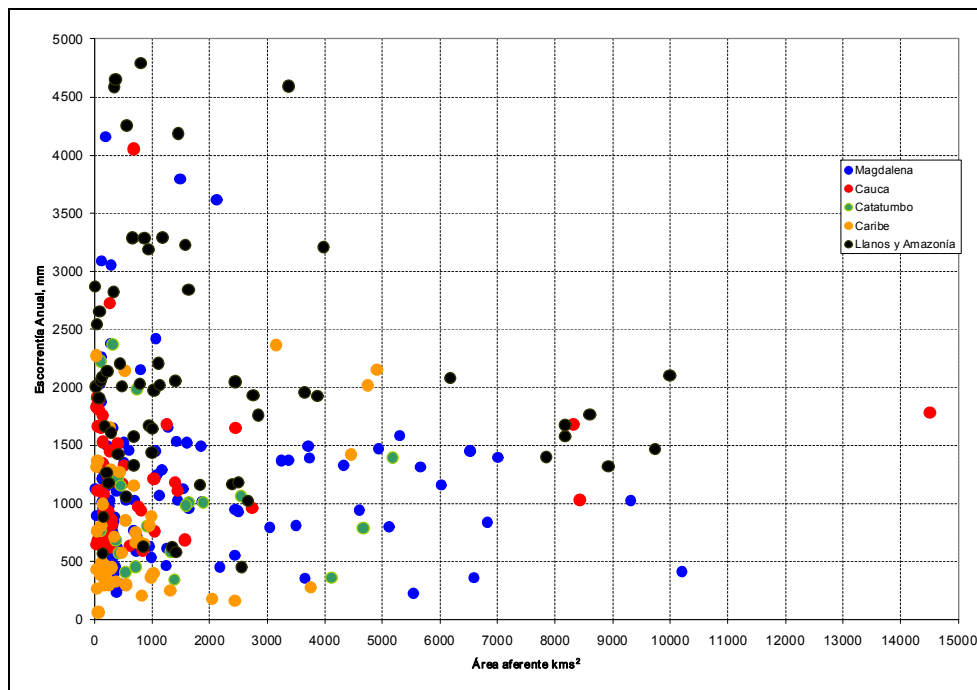


Figura 4. Comportamiento de la función $Y = f(A)$ para el territorio colombiano.

Para definir del 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 hidroclimático de una u otra región.

3.3. Densidad óptima 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 (Karasiyov, 1968 y 1972):

$$A_{representativa} \leq A_{gradiente} \leq A_{optima} \leq A_{correlativa} \quad (7)$$

De aquí se obtiene que el óptimo número de nodos N será igual a:

$$N_{nodos} = \frac{\text{Área de la cuenca}}{A_{optima}} \quad (8)$$

En la práctica también pueden presentarse los siguientes casos:

a) Caso 1

$$A_{correlativa} > A_{gradiente} > A_{representativa} \quad (9)$$

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

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

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

En esta situación el área óptima es igual a:

$$A_{optima} = \frac{A_{correlativa} + A_{gradiente}}{2} \quad (13)$$

b) Caso 2

$$A_{representativa} > A_{correlativa} > A_{gradiente} \quad (14)$$

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

En esta situación se debe tomar:

$$A_{\text{óptima}} = A_{\text{representativa}} \quad (16)$$

3.4. Insumos utilizados para evaluar la densidad espacial óptima

En términos generales los principales insumos que soportaron la evaluación de la densidad espacial óptima fueron: a) mapa de escorrentía (ver Figura 5a), b) mapa de gradiente de escorrentía, c) zonificación de áreas de análisis, d) hidrografía, e) zonificación de cuencas, f) modelo de elevación digital, g) catalogo de estaciones actuales, h) conocimiento histórico sobre la instalación y operación de la red actual y series de tiempo de caudales agregación anual y mensual.

4. RESULTADOS FINALES DE LA EVALUACIÓN DE LA DENSIDAD ÓPTIMA DE LA RED HIDROLÓGICA

La aplicación sistemática de los criterios formulados para establecer la densidad espacial óptima de los nodos de observación de régimen general (ver Figura 5b) para todo el territorio Colombiano, con excepción de San Andrés y Providencia, permitió establecer los valores de área de cobertura óptima para las distintas zonas de análisis en las que se subdividió el país. Estos resultados se encuentran resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Número óptimo de estaciones por zonas de análisis

ZONA DE ANALISIS	ESCORRENTIA PROMEDIO (mm)	GRADIENTE PROMEDIO (mm/m)	Cv	ÁREA DEL GRADIENTE (km²)	ÁREA CORRELATIVA (km²)	ÁREA REPRESENTATIVA (km²)	ÁREA OPTIMA (km²)	ÁREA DE LA ZONA DE ANALISIS (km²)	NUMERO OPTIMO DE ESTACIONES
Piedemonte Norte Sierra Nevada	1246	0,028	0,32	158	9	203	203	2326	11
Piedemonte Sureste Sierra Nevada	518	0,0146	0,34	101	13	276	276	2971	11
Piedemonte Oeste Sierra Nevada	954	0,0225	0,33	144	11	275	275	3881	14
Llanura catatumbo	1576	0,0224	0,31	396	40	1030	1030	9447	9
Piedemonte Catatumbo	933	0,0277	0,37	91	13	398	398	7086	18
Llanura Pacífico	4105	0,0208	0,3	3117	392	3930	3930	61573	16
Piedemonte Pacífico	3191	0,058	0,56	242	24	351	351	56693	162
Llanura Magdalena	1091	0,0096	0,4	1032	46	2090	2090	41854	20
Piedemonte Cauca este	1091	0,0212	0,33	212	29	123	123	27148	221
Planicie Amazonas Orinoco	1853	0,004	0,23	17162	2080	5860	5860	630710	66
Llanura Caribe	675	0,0092	0,68	430	13	2800	2800	110543	39
Piedemonte Magdalena Este	908	0,018	0,5	203	62	295	295	58452	198
Piedemonte Magdalena Oeste	1329	0,0339	0,57	123	9	1470	1470	39277	27
Llanura Cauca	1793	0,025	0,38	412	95	8480	8480	21592	3
Piedemonte Amazonia Orinoquia	2227	0,556	0,4	128	233	827	827	56084	68
Piedemonte Cauca Oeste	1342	0,0889	0,54	18	41	646	646	10718	17

En la actualidad el IDEAM opera 870 estaciones hidrométricas, cuyas áreas aferentes cubren un amplio rango de valores, desde aquellas localizadas en los cursos principales de pequeñas cuencas con áreas de drenaje menores a los 50 km², hasta las que corresponden a los ríos de primer orden como el Magdalena con áreas de drenaje que superan los 10.000 km².

Después de obtener el número óptimo de estaciones hidrológicas es necesario definir su distribución

geográfica aproximada en el territorio Colombiano. Para hacer esta distribución, el área óptima calculada para cada estación sirve de criterio de delineamiento. El proceso de delineación de las áreas óptimas se inicia desde el nacimiento de los ríos avanzando hasta su desembocadura. Debido a la intrincada configuración morfométrica de los ríos colombianos, de los 900 nodos del diseño óptimo se pudieron ubicar espacialmente 878 nodos (10% de divergencia con el número óptimo). Los resultados del análisis espacial señalan una coincidencia

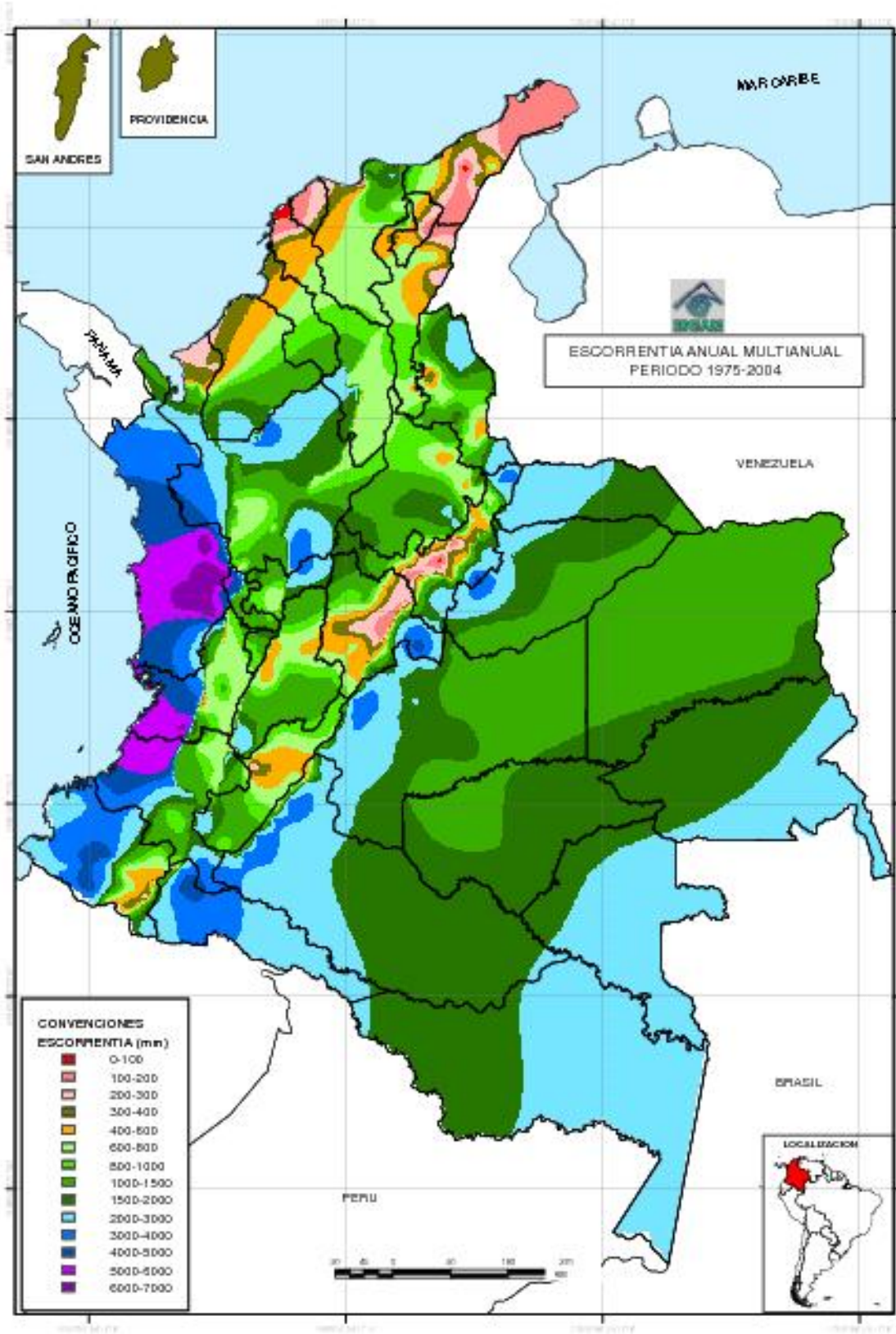


Figura 5. (a) Escorrentía Anual Multianual mm/año

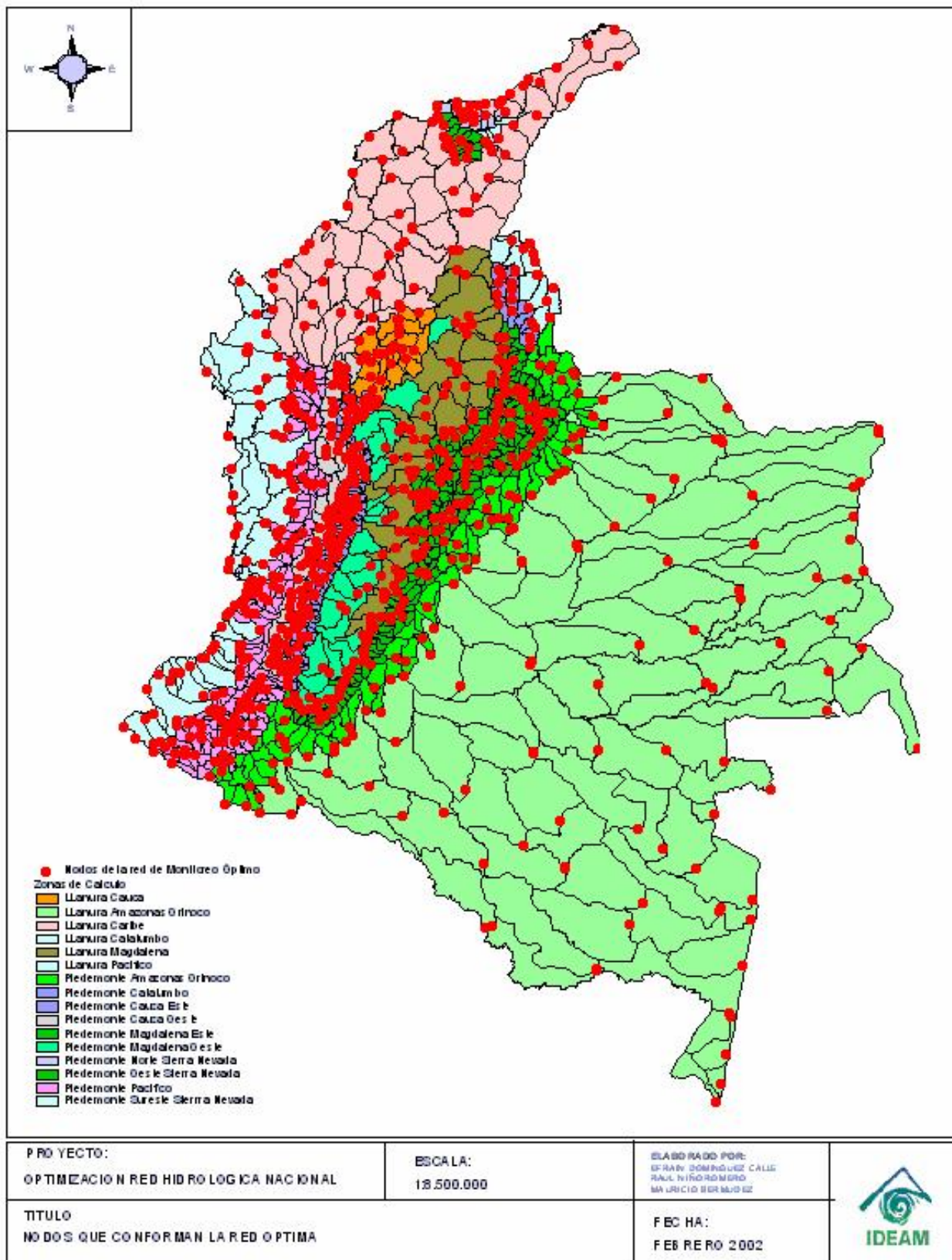


Figura 5 (b) Polígonos aferentes y nodos de observación óptimos

del 30% (véase Figura 6a) entre los nodos del diseño óptimo y los nodos de observación que actualmente conforman la red hidrométrica del IDEAM. La red de nodos coincidentes contiene estaciones de distintas categorías (véase Figura 6b), entre ellas algunas de la red de transmisión en tiempo real, sin embargo la mayoría corresponden a nodos convencionales.

La modelación espacial de datos estableció que en la estructura de la red actual existe un gran número de nodos con orientación de monitoreo específico. Algunos nodos no superan los 25 km² de área aferente y la determinación de su finalidad es una tarea casi imposible. Adicionalmente, el análisis espacial señala que de las 237 estaciones actuales, coincidentes con nodos del diseño óptimo el 24 % son limnimétricas (57 estaciones). Este híbrido de red, de acuerdo con Stanescu y Klohn (1972), se debe al diseño inicial, en el cual el 80% de los nodos fue destinado a las áreas con mayor densidad de población (zona andina) y el 20% restante se instaló en zonas planas. En los procesos posteriores de expansión de la red el 10% de las nuevas instalaciones se ubicó en corrientes pequeñas con lechos inestables.

El estado de los nodos físicos de monitoreo es otro factor que puede influir en el nivel de fiabilidad de la información producida en la red actual, en el presente estos nodos se encuentran en condiciones muy lejanas a las requeridas por los protocolos de muestreo internacionales que funcionan en el IDEAM. En algunos casos los principios básicos para la selección del lugar de instalación de los nodos de monitoreo no han sido cumplidos (García, 1999). El instrumental hidrométrico y los aparatos de registro continuo necesitan ser repuestos y actualizados con sistemas modernos de almacenamiento digital. Es urgente la implementación de métodos alternativos de aforo, así como el mejoramiento de algunos protocolos y la aplicación de otros nuevos como: bitácoras de instalación e inspección de estaciones, métodos para la construcción de curvas de gasto en secciones inestables, caracterización detallada del sector de ubicación de las estaciones (Karasiyov, Vasiliev, Subbotina, 1991) y la aplicación de modelos semi-instrumentales para el monitoreo (Kovalenko, 1993).

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra que la red actual difiere de la red óptima no en densidad sino en la cobertura óptima

de cada estación, ya que en el proceso de evolución de la red se han heredado estaciones de monitoreo que obedeciendo a objetivos específicos fueron instaladas en puntos con áreas aferentes mucho menores a los 200 km², magnitud que corresponde al área óptima mínima según los cálculos efectuados. Por lo anterior es preciso considerar en el futuro próximo el traslado de nodos existentes y construcción de nuevos nodos con el fin de alcanzar las especificaciones de la red hidrométrica óptima. La implementación de este proceso se puede adelantar gradualmente, con una intensidad de cierto número de estaciones nuevas o reubicadas por año. En un primer año este número puede ser de 100, identificando los nodos donde actualmente la densidad de la red hidrométrica es menor de la planteada por la red óptima.

Con esta intensidad de instalación de nodos de observación se puede alcanzar la red óptima en 4 ó 5 años. Desde el primer año la red puede comenzar a producir resultados como el balance hídrico anual y con planificación e inversión adicional se pueden obtener balances hídricos a escala mensual para las zonas favorecidas con la priorización en el ajuste de la red existente.

Es importante fortalecer la implementación de estaciones automáticas, e indispensable verificar si los sitios de instalación actual de infraestructura hidrométrica cumplen con los objetivos para los cuales fueron seleccionados.

Como parte de las innovaciones construidas a través de la investigación que trae a la luz el presente trabajo cabe señalar un sutil perfeccionamiento de la metodología de Karasiyov con el fin de ajustar los procedimientos técnicos a la disponibilidad informática de Colombia en el campo de la Hidrología y al nivel tecnológico correspondiente a la capacidad institucional del IDEAM. Como parte de ello se introdujo la cuantificación de las variables determinantes de los criterios mediante la construcción y evaluación del campo de escorrentía por medio de herramientas Geoestadísticas (elementos de interpolación óptima, operador de gradiente, evaluación automática de correlogramas espaciales). De esta manera se intentó eliminar, en el mayor grado posible, los componentes de subjetividad en la evaluación de los criterios. La construcción del campo de escorrentía se aplicó utilizando mecanismos de interpolación objetiva basados en los trabajos de Drozdov, (1936), Drozdov y Shpeliyovskiy, (1946) y Gandin, (1963, 1976).

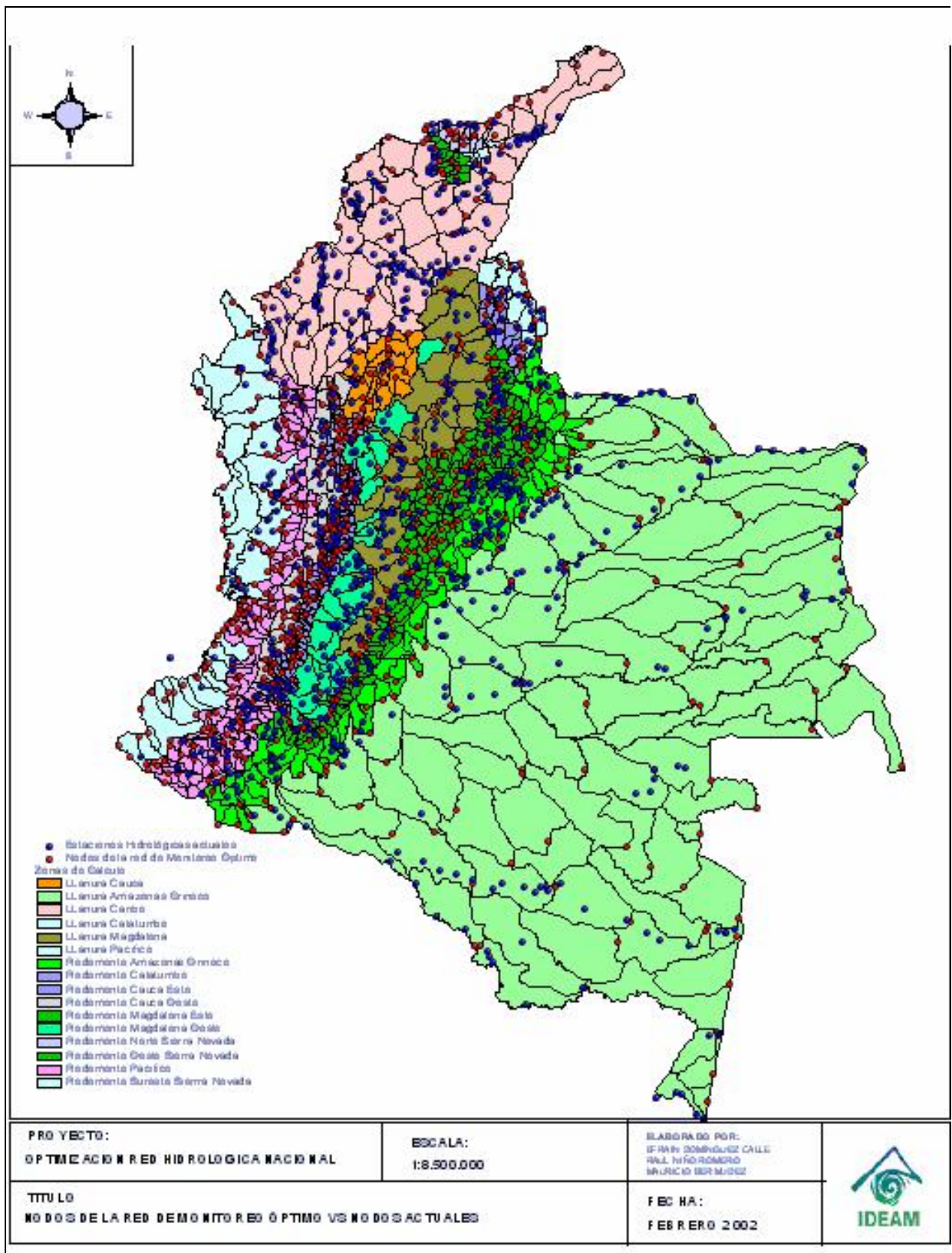


Figura 6. (a) Comparación de la red hidrológica actual versus la red óptima

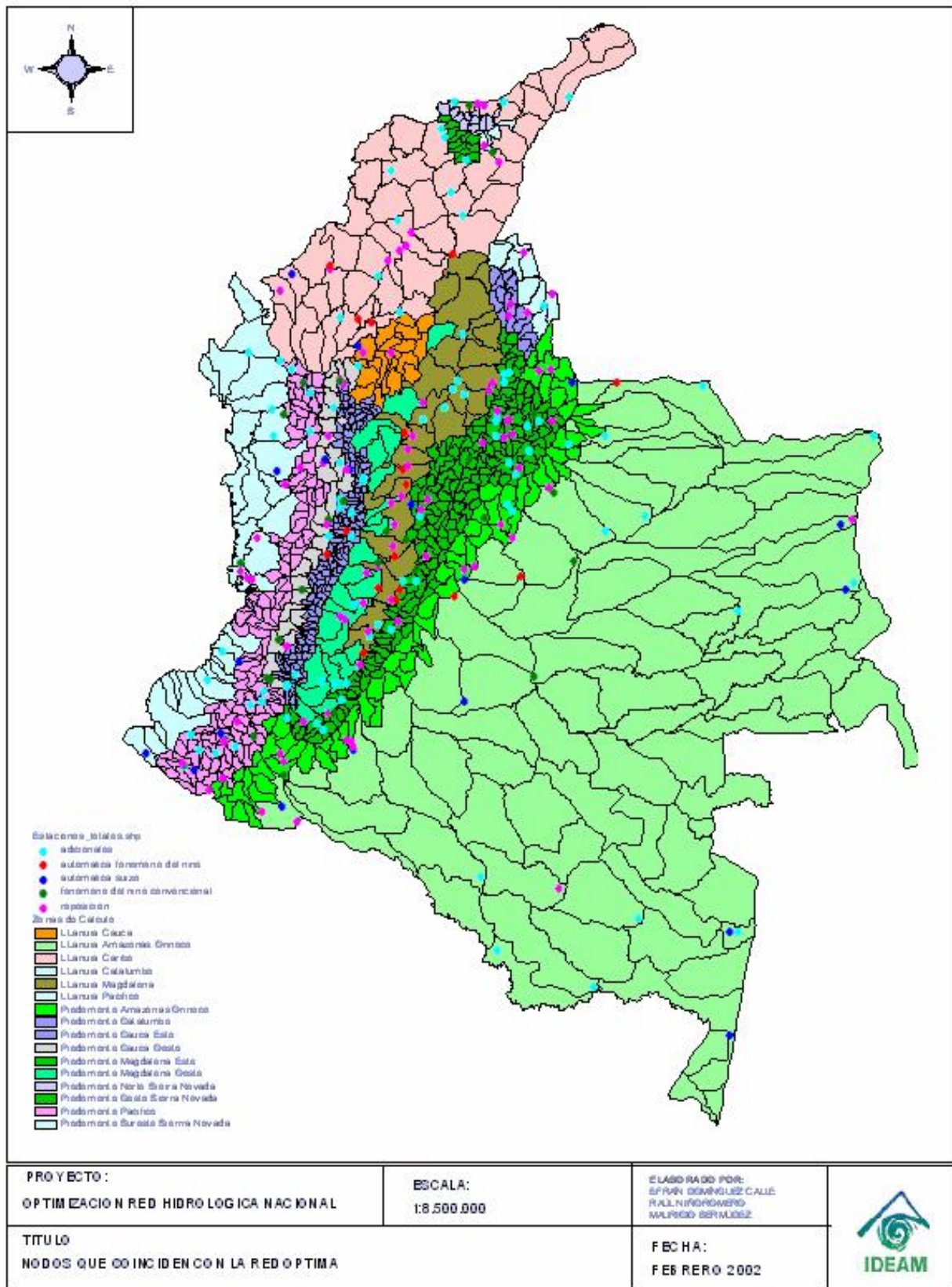


Figura 6 (b) Red de nodos coincidentes con la red óptima y su clasificación.

El trabajo realizado debe ser complementado con elementos de evaluación económica crítica que establezcan la viabilidad de implementación, operación y sustento de un sistema de monitoreo ambiental integral.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Domínguez E., 2000, Diagnóstico de la Red Hidrométrica de la Corporación Autónoma Regional del Quindío. IDEAM, Santa Fe de Bogotá, 22 P.
- Domínguez E. y Niño R., 1998, Criterios Físico-Económicos para la Red de Referencia Óptima IDEAM, Santa Fe de Bogotá, 26 P.
- Drozdov O.A. y Shepeliovskiy A.A., 1946, Teoría de la interpolación de un campo estocástico y su utilización en mapas meteorológicos y racionalización de la red, Trabajos del NIU – GUGMS, serie 1 Vol 13.
- Drozdov O.A., 1936, Método de construcción de redes meteorológicas en regiones planas, Trabajos del GGO Edición 12 (3).
- Gandin L. S., 1976, Análisis tetradimensional de campos meteorológicos, Guidrometeoizdat, Leningrado, 61 P.
- Gandin L. S., 1963, Análisis objetivo de campos meteorológicos, Guidrometeoizdat, Leningrado, 287 P.
- García M. (Ed.), 1999, Sistema de Información Componente Hidrológico - Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos. IDEAM, Santa Fe de Bogotá.
- Golden Software, 1995, Surfer for Windows Contouring and 3D Surface, User's Guide – Version 6 Mapping, Golden – Colorado
- Karasiov I.F., Vasiliev A.V. y Subbotina E.S., 1991, Hidrometría, Guidrometeoizdat, Leningrado, 376 P.
- Karasiov I.F., 1972, Physical and Statistical Methods For Network Design. Case Book on Hydrological Network Design Practice, WMO – No 324, Ginebra.
- Karasiov, I.F., 1968, Principles for Distribution and Prospects for Development of Hydrologic Network. Transactions of State Hydrological Institute Trudy GGY 164, Leningrado.
- Kovalenko, V.V., 1993, Modelación de Procesos Hidrológicos. Guidrometeoizdat, San Petersburgo.
- Moss, M.E., 1982, Concepts and Techniques in Hydrological Network Design. WMO- No 580, Geneva.
- NOAA, 1999, The modernized end to end forecast process for quantitative precipitation information – hydrometeorological requirements, scientific issues and service concept, Silver Spring, 187 P.
- Pabón, J., García, M. y Collantes P., 1997, Base Conceptual del Diseño de una Red de Observación de la Hidrosfera y de la Atmósfera para Colombia. IDEAM Nota Técnica METEO/003-97, Santa Fe de Bogotá.
- Rodda, C. J. (Ed.), 1980, Facets of Hydrology, John Wiley y Sons, London
- Stanescu S. y Klohn W., 1972, Organization of National Hydrometric Networks: The Colombian Hydrometric Experience, WMO – No 324, Ginebra.
- WMO, 1972, Case Book on Hydrological Network Design Practice. WMO – No 324, Ginebra.