

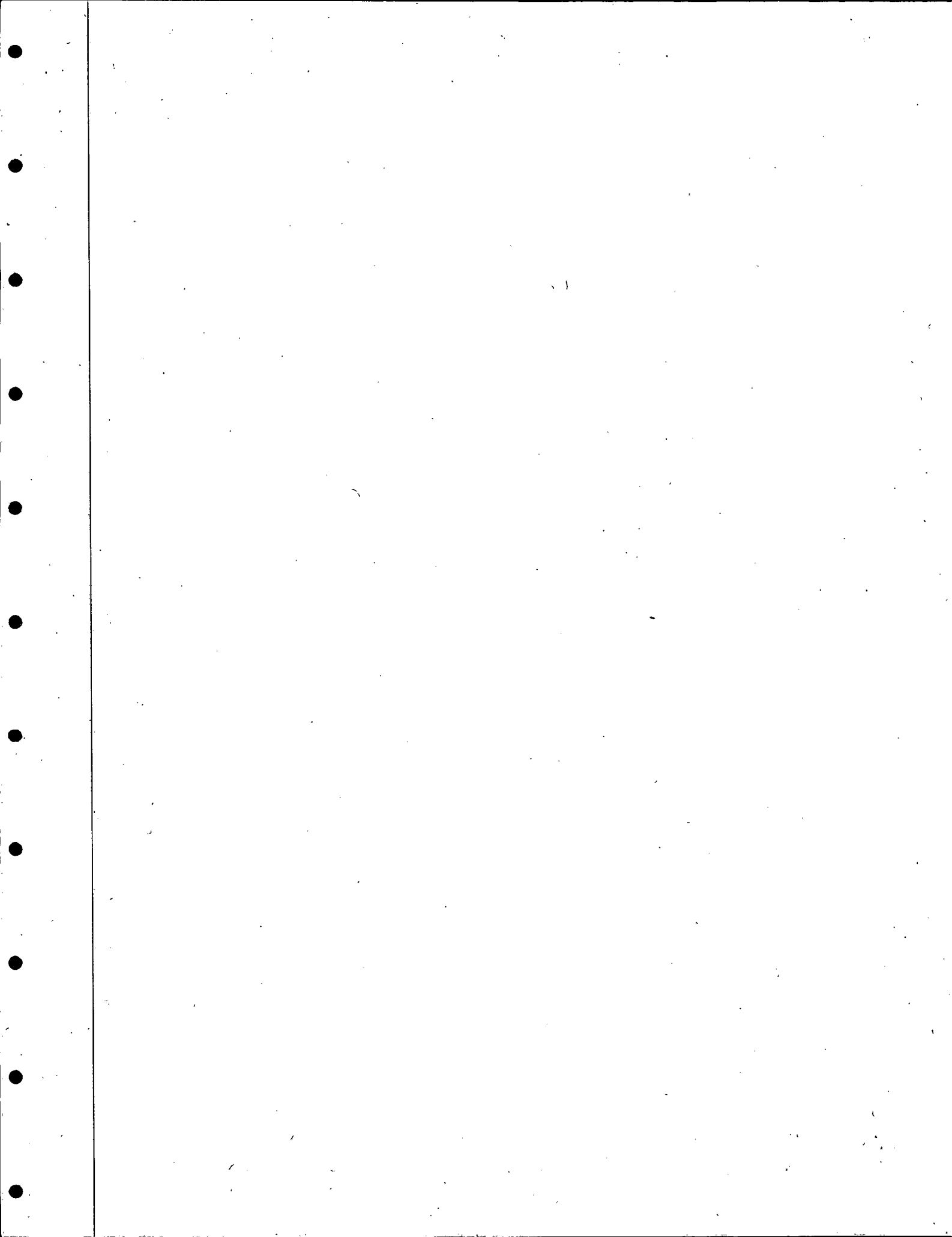
Prof. Alfredo Rivas Lopez

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA

**DISEÑO DE REDES HIDROMETEOROLÓGICAS, APLICACION
A LA CUENCA DEL RIO CAURA**

DR. EDILBERTO GUEVARA PEREZ
VALENCIA - VENEZUELA
ABRIL - 1981



Prof. Rivas López -

TESIS
GP
81

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA

DISEÑO DE REDES HIDROMETEOROLOGICAS, APLICACION A LA CUENCA DEL RIO CAURA

Dr. EDILBERTO GUEVARA PEREZ

VALENCIA - VENEZUELA

ABRIL 1981

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA

DISEÑO DE REDES HIDROMETEOROLOGICAS, APLICACION A LA CUENCA DEL RIO CAURA

Trabajo presentado ante
el Consejo de la Facultad de Ingeniería para
optar al ascenso a la -
Categoría de Profesor -
Agregado.-----

Dr. EDILBERTO GUEVARA PEREZ

VALENCIA - VENEZUELA

ABRIL 1981

I N D I C E

PRESENTACION	VII
RESUMEM	IX
1.- GENERALIDADES	1
2.- CONCEPTOS BASICOS PREVIOS AL DISEÑO DE REDES	2
2.1 Clasificación de las Redes	2
2.2 Consideraciones sobre la red mínima óptima.....	5
2.3 Criterios sobre la ubicación física de las estaciones..	6
3.- METODOS PARA EL DISEÑO DE REDES HIDROMETEOROLOGICAS	7
3.1 Consideraciones Previas	7
3.2 Método de Organización Meteorológica Mundial -	8
WMO.....	
3.3 Método de correlación espacial - KAGAN.....	10
3.4 Método de teorema de muestreo - EAGLESON	12
3.5 Método de Rodriguez Iturbe y Mejía - RIM	14
3.6 Método de HUFF	18
3.7 Método de LANGBEIN	19
3.8 Método de las Imágenes Satelitarias - EARTHSAT	21
3.9 Criterios económicos para la evaluación de la red hidrometeorológica.....	29
4.- DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLOGICA PARA LA CUENCA DEL -- RIO CAURA.....	29
4.1 Descripción general de la cuenca.....	29
4.2 Método de la WMO.....	30
4.3 Método de KAGAN	33
4.4 Método de EAGLESON.....	36
4.5 Método RIM	39
4.6 Método de HUFF	41
5.- DISCUSION SOBRE LA APLICABILIDAD DE LOS METODOS.....	42
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
7.- BIBLIOGRAFIA	50

LISTA DE TABLAS

1.-	Densidad mínima para estaciones pluviométricas recomendada por la WMO.....	9
2.-	Densidad mínima para estaciones hidrométricas recomendadas por la WMO.....	9
3.-	Requerimientos mínimos estimados para la red hidrometeorológica en la cuenca del río Caura.....	30
4.-	Resultados obtenidos para la red hidrometeorológica por el método empírico.....	32
5.-	Resumen de los resultados obtenidos en el diseño de la red hidrometeorológica para el Caura.....	33
6.-	Matriz de correlación espacial y de distancias entre estaciones en la cuenca de río Caura.....	34
7.-	Datos básicos de la función de correlación espacial en la cuenca del río Caura.....	35
8.-	Resultados obtenidos por el Método de KAGAN.....	37
9.-	Espaciamiento entre pluviómetros obtenido por el Método de EGLESON.....	38
10.	Porcentaje de reducción de la varianza en la estimación del promedio a largo plazo en la cuenca del río Caura.....	40
11.	Errores de estimación de la precipitación media mensual por el método de HUFF.....	42

LISTA DE FIGURAS

- | | | |
|-----|---|----|
| 1.- | Mapa de ubicación de la cuenca del río Caura | 45 |
| 2.- | Función de correlación espacial para la cuenca del río - Caura. | 46 |
| 3.- | Errores relativos de la precipitación media (Z1) y de la interpolación espacial (Z3) en función del número de estaciones. | 47 |
| 4.- | Distribución de alturas de precipitación promedio sobre la cuenca del río Caura - Julio 1969 - 1976. | 48 |
| 5.- | Factor de reducción de la varianza debido al muestreo espacial. | 49 |
| 6.- | Factor de reducción de la varianza debido al muestreo en el tiempo. | 49 |
-
-

PRESENTACION

Uno de los aspectos fundamentales del proceso de planeamiento, diseño y operación de sistemas de obras hidráulicas, es el de la disponibilidad de información hidrometeorológica básica requerida para los estudios en calidad y -- cantidad suficiente. En la mayoría de los países, la recolección de datos se efectúa a través de varios organismos, en muchos casos sin coordinación alguna; en otros, se ha logrado establecer una institución única para tal fin. -- Algunas veces, la implementación de la red de estaciones se efectúa sin planificación, o su operación se desmejora por falta de fondos ó de la visión -- por parte de la entidad respectiva sobre la importancia que tiene en el desarrollo de los recursos hidráulicos.

En Venezuela con la creación de COPLANARNH, se logró centralizar la recolección de datos y actualmente se efectúa a través de la Red Nacional de Meteorología e Hidrología del Ministerio del Ambiente, salvo las excepciones de proyectos específicos tal como Guri, Uribante Caparo, etc. COPLANARNH también elaboró el Plan Nacional de Instalaciones Hidrometeorológicas 1976 - 1985 para la expansión de la red; sin embargo dicho plan sólo se ha cumplido parcialmente y en la zona del norte del Orinoco, más no así en la región sur donde -- los recursos hídricos son abundantes pero de características desconocidas. De otro lado, la sociedad Venezolana de Hidrometeorología en un foro efectuado -- en Junio de 1980 discute las preocupaciones creadas como consecuencia de la -- paralización de dicho plan de instalaciones y denuncia en el periódico El Nacional (17-06-80) un supuesto desmantelamiento de muchas estaciones y la puesta fuera de operación de otras.

La inquietud creada por tal situación, ha inducido al autor del presente trabajo a preparar, como un aporte a este tema de gran actualidad, un resumen de los principales criterios para el diseño de redes hidrometeorológicas y aplicar algunos, justamente a una de las cuencas más importantes de la zona sur, -- como es la del río Caura.

La cuenca viene siendo estudiada desde unos años atrás, en busca de sitios de interés, desde el punto de vista técnico y económico, para el aprovechamiento

de su potencial hidroeléctrico.. Dentro de ese esquema, el mejoramiento de la información básica hidrológica demanda atención inmediata. Por lo tanto se - considera que este estudio es de gran importancia para el desarrollo de los - recursos hídricos en la región, y por que no decirlo, en el país.

RESUMEN

El objetivo fundamental del presente trabajo viene a constituir el diseño de una red hidrometeorológica con requerimientos de densidad mínima para la cuenca del río Caura.

En el trabajo se enfocan en primer lugar los conceptos básicos que rigen el diseño de redes hidrometeorológicas. Luego se efectúa una descripción detallada de las más importantes metodologías usadas en el planeamiento de programas para la implementación de estaciones de medición. Finalmente se discute la utilidad de cada método para el objetivo planteado, comparando los resultados obtenidos, unos con los otros.

Todos los procedimientos empleados para el diseño de la red arrojan resultados similares, quedando así manifiesta su aplicabilidad. Sin embargo, el método de KAGAN se refleja como el más aplicable, y su versatilidad ha sido demostrada también en las cuencas de los ríos Caroní y Tuy.

En base al análisis efectuado se determinó que no es necesario expandir la red actual a más de 30 estaciones pluviométricas, 14 hidrométricas y 8 evaporimétricas. Sin embargo, se recomienda prestar especial atención a los aspectos de ubicación física, instalación y operaciones para obtener datos de buena calidad.

./...

1.- GENERALIDADES.

Los fenómenos hidrometeorológicos se estudian mediante el análisis de las series de datos medidos en sitios o estaciones de medición distribuidos sobre el área de la región considerada. El conjunto de todas las estaciones constituye lo que se denomina "la red hidrometeorológica", la cual debe ser un sistema organizado y dinámico, y su propósito, la recolección de los datos indicados. De allí que los componentes de la red deben relacionarse entre sí en tal forma que cada estación cumpla con una función específica dentro del conjunto.

Uno de los mayores problemas que se afronta en los estudios de aprovechamiento de los recursos hidráulicos de una región, es el de saber si la información básica disponible posee la suficiente confiabilidad, de modo que permita la extrapolación de los datos puntuales hacia el área total. Se pretende que el diseño de la red resuelva el problema que se plantea sobre el número de estaciones a ser operadas, la ubicación de cada una de ellas, el período de operación y los detalles del programa de observación de los parámetros hidrometeorológicos.

Indudablemente que la densidad de la red y la duración de las observaciones dependen de la variabilidad en el tiempo y en el espacio del parámetro que se desea observar. Hasta ahora, todos los procedimientos propuestos para el diseño de redes no resuelven el problema desde el punto de vista práctico. Sin embargo, debido a que tales redes tienen que ser implementadas, se debe efectuar algún tipo de síntesis que involucre a las consideraciones teóricas y a la experiencia práctica del hidrólogo para aplicaciones locales. Por lo expuesto, es indispensable no perder jamás de vista el objetivo principal, vale decir la puesta en evidencia de las características del régimen hidrológico en la región que se estudia. Para tal fin, las estaciones deben ser ubicadas en tal forma que los datos que ellas suministren puedan servir de base para establecer relaciones entre las características meteorológicas y las hidrológicas y entre éstas últimas y los parámetros físicos significativos de la cuenca.

2.- CONCEPTOS BASICOS PREVIOS AL DISEÑO DE REDES.

2.1. CLASIFICACION DE LA RED.

No existe un patrón estandar de clasificación de las redes, éstas se clasifican siguiendo diversos sistemas, ya sea de acuerdo al período de operación, al tipo de parámetro a observar ó al uso que se darán a los datos.

Tomando en cuenta tanto aspectos técnicos como económicas, la Organización Meteorológica Mundial, WMO (1.967), recomienda no multiplicar inutilmente el número de estaciones de operación permanente, estableciendo la siguiente clasificación:

- a) Estaciones principales o de base, de operación permanente, continua e indefinida, proporcionan la base de los estudios estadísticos.
- b) Estaciones secundarias, operadas durante un período limitado, suficientemente largo como para establecer relaciones válidas entre los datos de ellas y los de las principales.
- c) Estaciones especiales, para objetivos particulares.

En Venezuela se usa el siguiente sistema de clasificación, de acuerdo al tipo de parámetro a observar y al uso que se da a los datos (COPLANARNH, 1978):

- a) Estaciones hidrométricas, conectadas con la recolección de datos referentes a caudales y sedimentos. Se subdividen en los seis tipos que se indican a continuación:

<u>TIPO Nº</u>	<u>INFORMACION QUE SE OBTIENE</u>
1	Aforos, niveles con registrador y sedimentos
2	Aforos, niveles con lectura de mira y sedimentos.
3	Niveles con registrador

<u>TIPO Nº</u>	<u>INFORMACION QUE SE OBTIENE</u>
4	Niveles con lectura de mira y sedimentos
5	Niveles con lectura de mira
6	Aforos y sedimentos

b) Estaciones meteorológicas, relacionadas con la recolección de datos meteorológicas. Se subdividen como sigue:

<u>LEYENDA</u>	<u>TERMINOLOGIA USADA</u>	<u>TIPO DE OBSERVACION</u>
A1	Radio- Viento Sonda	Como A2, pero efectúa también lanzamientos de radiosonda.
A2	Radio-Viento	Lanzamiento de globos piloto, la misma información que SB.
SB	Sinóptica Básica	Observaciones meteorológicas con fines sinópticos
SP	Sinóptica Suplementaria	Auxiliar de SB
C1	Climatológica Principal	Observaciones horarias o por lo menos 3 veces diarias y registro de todos los parámetros.
C2	Climatológicas de 2º Orden.	Precipitación, evaporación, Temperatura, viento, insolación algunos con registro
C3	Climatológicas de 3er. Orden.	Precipitación, evaporación y Temperaturas extremas.
PE	Pluvio-Evaporimétrica	Precipitación y Evaporación
PR	Pluviográfica	Precipitación con registrador
PC	Cántaro	Precipitación diaria
PT	Totalizador	Precipitación de largos períodos

Otro sistema de clasificación muy práctico consiste en dividir las estaciones en dos grupos: Sinópticas e Hidrometeorológicas. Las primeras comprenden las categorías SB, SP, A1 y A2 dadas anteriormente. Las segundas se subdividen como se indica a continuación (GUEVARA, 1980; MUÑOZ, 1975):

- a) Estaciones hidrológicas: relacionadas con la recolección de datos sobre caudales, sedimentos y calidad de agua:

<u>NOMENCLATURA</u>	<u>TIPO DE DATO</u>
Limnimétrica	Aforos, niveles con mira y sedimentos
Limnigráfica	Aforos, niveles con mira y registrador, sedimentos.

Los aforos se efectúan a pie, por bote o mediante cables:

- b) Estaciones meteorológicas; relacionadas con la observación de los parámetros meteorológicos:

<u>NOMENCLATURA</u>	<u>TIPO DE DATO</u>
Primera Clase	Valores diarios de precipitación, temperatura, humedad, viento, número de horas de sol, evaporación, temperatura del agua en tina, temperatura del suelo ; registro de precipitación, temperatura y humedad.
Segunda Clase	Valores diarios de precipitación, temperatura, evaporación, temperatura del agua, humedad y viento; registro de precipitación.
Tercera Clase	Valores diarios de precipitación y temperaturas extremas.
Cuarta Clase	Precipitación diaria en una o más observaciones

NOMENCLATURATIPO DE DATO

Totalizadores

Precipitación de largos períodos

Por constituir el caudal y la precipitación los más importantes parámetros de diseño de las obras para aprovechamientos hidráulicos, el estudio que se efectúa en el presente trabajo se centra en éstos dos parámetros. De ellos, la precipitación se ha tomado como variable fundamental para el análisis de los criterios de diseño teóricos (capítulos 3 y 4).

2.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA RED MINIMA OPTIMA.

Ya se ha acotado más arriba que el objeto de la red es la realización -- plenamente satisfactoria del programa de recolección de datos hidrometeorológicos. Esto indica que la red debe ser tal que por vía de interpolación de los datos observados en las diferentes estaciones que la conforman, sea posible determinar con buena exactitud, para los requerimientos prácticos, las características de los principales elementos hidrometeorológicos de base, en cualquier punto del área en estudio. Se entiende por características a todos los valores cuantitativos, promedios y desviaciones que permitan definir la distribución estadística del elemento estudiado.

Siguiendo los criterios expuestos por LANGBEIN (1960) se define a la red óptima como aquella constituida por un número tal de estaciones, que el costo en adicionar una más, es mayor que el beneficio adicional que podría proporcionar dicha estación. Una definición alterna sería la que considera a la red óptima como la que permite por vía de interpolación la definición de las características hidrológicas en cualquier punto de la cuenca.

La implementación de una red óptima racional podría requerir una densidad de estaciones muy grande, en cuyo caso importa más concluir en un mínimo número de ellas en tal forma de obtener un conocimiento mínimo de las características hidrológicas de la cuenca, pero sin dejar lagunas importantes; y efectuando la instalación con la mayor rapidez y la operación con la mejor calidad posible.

La utilización de aparatos o instrumentos adecuados viene a ser de gran utilidad complementaria, conjuntamente con el control permanente de calidad y la rapidez del procesamiento de los datos.

No existen normas estandares que fijen la densidad mínima de redes. El promedio mundial para estaciones hidrométricas es de 0,3 estaciones cada 1000 Km². LANGBEIN (1960) recomienda usar como mínimo razonable, para densidades demográficas de 15 a 180 habitantes por Km², 0,2 estaciones hidrométricas y 2 estaciones pluviométricas por cada 1000 Km² de superficie. Adicionalmente indica que una de cada cinco meteorológicas debe estar equipada con un pluviógrafo; una de cada 10, con equipo para medir la evaporación, velocidad del viento, humedad y temperatura del agua; una estación de primera clase cada 15000 Km² y una de segunda también cada 15000 Km.

Cualquiera que fuere el criterio que se considere, debe quedar implícito la hipótesis de continuidad de los factores genéticos que determinan el regimen hidrológico, individualizando las discontinuidades notorias.

2.3. CRITERIOS SOBRE LA UBICACION FISICA DE LAS ESTACIONES.

El mayor problema relacionado con la distribución de las estaciones lo constituye la accesibilidad. Cuando ésta no es limitante, la distribución de las estaciones meteorológicas puede ser efectuada en forma aleatoria, a espaciamientos deducidos del análisis de la red. Todos los criterios de distribución implican sin embargo la consideración de homogeneidad, distribución igualitaria para las Subcuencas; aspectos geográficos, topográficos y de altitud y condiciones climáticas.

En relación con la red hidrológica, se recomienda ubicar las estaciones: donde los grandes rios atraviezan los bordes nacionales; cerca de las desembocaduras; cada 200 a 500 Km si los grandes rios no poseen tributarios importantes, o accidentes geográficos que interrumpen el curso; en secciones de discontinuidad; aguas abajo de tributarios; en las zonas de transición entre regiones de degradación y deposición; a intervalos no mayores de 500 m. en elevación; aguas abajo y aguas arriba de derivaciones; etc.

Todas estas recomendaciones son muy útiles en la práctica, pero no resuel-

ven el problema de proyectar una distribución espacial racional, organizada y eficiente. Por lo tanto, la distribución debe ser tal que cumpla con las condiciones de red mínima óptima, vale decir que permita el conocimiento de los principales parámetros hidrológicos en cualquier punto de la región. Mediante un número de estaciones hidrométricas convenientemente distribuidas, es posible identificar los complejos procesos que determinan el comportamiento hidrodinámico y geográfico del caudal y por lo tanto se pueden encontrar las leyes que gobiernan la variación territorial de los parámetros hidrológicos. Los factores genéticos -- significativos del regimen hidrológico son muchos, pero sus acciones se combinan de modo tal que sólo unos pocos son de importancia relevante. Entre estos últimos figuran el Area de la Cuenca, la pendiente, la elevación (para condiciones homogéneas de geología, morfología y vegetación), la densidad de drenaje, etc. Luego de haber reconocido las características indicadas, éstas se tomarán en cuenta para decidir la ubicación más adecuada para las estaciones, individualizando áreas de relativa homogeneidad o variación continua y minimizando los factores genéticos determinantes del regimen hidrológico.

3.- MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE REDES HIDROMETEOROLÓGICAS

3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Ya se ha mencionado anteriormente que los dos parámetros más importantes son el caudal y la precipitación. La densidad y ubicación de las estaciones hidrométricas se definen en base a las características del sistema de drenaje y los objetivos para los que se recolectan los datos.

La precipitación es normalmente el elemento más variable y su caracterización es más comunmente usada para los estudios de los proyectos hidráulicos.

Por lo expuesto, a excepción del método de la WMO, todos los otros descritos en el presente trabajo se relacionan con el diseño de redes pluviométricas.

La mayoría de los métodos teóricos usan como criterio básico la teoría de los errores de estimación de la variable que se muestrea en referencia con la variación del número de observaciones, ya sea en el tiempo (número de años de registro) ó en el espacio (número de puntos de observación).

Debido a la dificultad en la obtención de la información básica, y al esfuerzo en tiempo que requiere el procesamiento, sólo se analizan los datos disponibles en cada cuenca de acuerdo a ciertos criterios propios de cada caso, quedando abierta la posibilidad de complementar el análisis, en base a un período común de observaciones.

3.2. METODO DE LA ORGANIZACION METEOROLOGICA MUNDIAL - WMO.

La WMO ha tratado de cuantificar los requerimientos de estaciones hidrometeorológica relacionando el número de estaciones por unidad de área de diversos países con la densidad de población, arriivando por analogía y extensión a un objetivo mínimo deseable (RODDA, 1969 WMO, 1967). El método es muy útil como primera aproximación; sin embargo, cada red existente expresa realidades económicas y sociales diferentes; cualquier extrapolación que se intente hacer trae consigo ciertos riesgos, aún cuando las condiciones físicas de las áreas que se comparan sean similares.

Los criterios de la WMO expresan el consenso de expertos sobre la materia y supeditan la densidad mínima a las características físicas y demográficas. En lo que respecta a los aspectos físicos se distinguen entre regiones planas y montañosas de clima templado y mediterráneo; zonas tropicales, áridas y polares. Para cada una de ellas se ha establecido un rango admisible de densidad en condiciones normales y excepcionalmente difíciles. La selección final de un valor adecuado dentro del rango será hecha por el hidrólogo de acuerdo a su criterio y experiencia en concordancia con el desarrollo económico y demográfico de la región. A continuación, en las Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de los valores de densidad mínima para las redes pluviométricas e hidrométricas establecidas por la WMO (1967); los criterios de ubicación recomendados por la WMO son similares a los expuestos en el punto 2.3.

Tabla 1. Densidad mínima para la red pluviométrica recomendada por la WMO.

TIPO DE REGION	DENSIDAD MINIMA Km2/ Est.	DENSIDAD TOLERABLE PARA CONDICIONES DI- FICILES Km2 / Est.
1.- Regiones planas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales.	600 - 900	900 - 3000
2.- Regiones montañosas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales.	100 - 250	250 - 1000
Pequeñas islas montañosas con precipitaciones irregulares y sistema hidrográfico intenso.	25	
3.- Zonas áridas y polares	1500 - 10000	

Tabla 2. Densidad mínima para redes hidrométricas recomendadas por la WMO.

TIPO DE REGION	DENSIDAD MINIMA Km2 / Est.	DENSIDAD TOLERABLE PARA CONDICIONES DI- FICILES Km2 / Est.
1.- Regiones planas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales.	1000 - 2500	3000 - 10000
2.- Regiones montañosas de zonas templadas mediterráneas y tropicales.	300 - 1000	1000 - 5000
Pequeñas islas montañosas con precipitaciones irregulares y sistema de drenaje intenso.	140 - 300	
3.- Zonas áridas y polares	5000 - 20000	

En referencia a las estaciones evaporimétricas, la WMO recomienda los valores siguientes como objetivo mínimo:

Regiones áridas	1 Est./30000 Km ²
Regiones templadas y húmedas	1 Est./50000 Km ²
Regiones frías	1 Est./100000 Km ²

Por lo demás, los criterios sobre ubicación y recolección de los datos son los mismos que recomienda LANGBEIN (1960), expuestos en el capítulo 2.

3.3. METODO DE CORRELACION ESPACIAL - KAGAN

Una red pluviométrica puede ser diseñada para cumplir con un criterio de error específico, si se acepta que la variabilidad de la precipitación - en el espacio, puede ser cuantificada a través de una función de correlación espacial (KAGAN, 1966; WMO, 1972). Sin embargo se debe tomar mucho cuidado en establecer las condiciones de homogeneidad horizontal e isotropía, que determinan la existencia de dicha función (SHAW Y O'CONNELL, 1975).

GANDIN (1970) presenta una revisión general teórica de los métodos de correlación espacial para la planificación de redes meteorológicas. Detalles del método y su aplicación a la práctica fueron dados por KAGAN --- (WMO, 1972). 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. Normalmente se usa la siguiente expresión exponencial:

$$\rho(d) = \rho(o) e^{-d/d_0} \quad (1)$$

Donde:

- d = Distancia entre estaciones
- $\rho(o)$ = Coeficiente de correlación cruzada para una distancia d=0
- d₀ = Radio de correlación, o distancia a la cual el coeficiente de correlación 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 las diferencias microclimáticas que podrían presentarse en el área. KAGAN (1966) estima la varianza de dichos errores de acuerdo a la siguiente expresión:

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

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:

a) EVALUACION DE LA PRECISION DE LA LLUVIA PROMEDIO:

La varianza del error en la precipitación media sobre un área unitaria, "a", con una estación central se define como sigue:

$$V = \sigma_p^2 [1 - \rho(o)] + 0.23 \sigma_p^2 \sqrt{a} / d_o \quad (3)$$

El primer sumando de la ecuación (3) viene a ser el error de medición dado en (2) y el segundo, la variación espacial. Considerando el área total A con n estaciones uniformemente distribuidas, tal que $A = a \times n$, la ecuación (3) será:

$$V_n = \frac{\sigma_p^2}{n} \left[1 - \rho(o) + \frac{0.23}{d_o} \sqrt{\frac{A}{n}} \right] \quad (4)$$

El error cuadrático medio relativo, Z1, será entonces:

$$Z1 = \frac{\sqrt{V_n}}{\bar{p}} = C_v \left[\frac{1 - \rho(o) + \frac{0.23}{d_o} \sqrt{\frac{A}{n}}}{n} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Donde: $C_v = \sigma_p^2 / \bar{p}$

\bar{p} = Precipitación media sobre el área A.

Conociendo $\rho(o)$ y d_o , la ecuación (5) proporciona el valor de n (Nº de estaciones) para un error, Z1, fijo y viciversa.

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

$$L = \left[\frac{A}{n} \right]^{1/2} \quad (6)$$

La distribución triangular es más conveniente, especialmente cuando el área posee una configuración compleja. En este caso, el espaciamiento es:

$$L = 1,07 \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (7)$$

b) EVALUACION DE LA PRECISION DE LA INTERPOLACION 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:

$$Z_3 = C_v \left\{ \frac{1}{3} [1 - \rho(0)] + 0,52 \frac{\rho(0)}{d_0} \sqrt{\frac{A}{n}} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

La evaluación de Z_1 y Z_3 requiere del conocimiento de $\rho(0)$ y d_0 , los cuales pueden ser evaluados de la función $\rho(d)$, establecido en base a los datos observados.

Para la aplicación del método, KAGAN indica que se debe tomar como límite de precisión para Z un valor de 10% como máximo. Sin embargo, esto constituye un procedimiento arbitrario, por lo que también es razonable aplicar el análisis de un descenso no significativo del valor de Z con el incremento del número de estaciones, aún cuando éste se encuentre por arriba de 10.

3.4. METODO DEL TEOREMA DE MUESTREO - EAGLESON.

Algunos investigadores, entre ellos EAGLESON y SHACK (1.966), utilizan el análisis armónico para estimar la variabilidad espacial de tormentos y el comportamiento dinámico de la cuenca, de modo de determinar la densidad de las estaciones, de acuerdo al principio de que -

el muestreo de una señal en tiempo o en espacio, es a menudo suficiente para definir la posición de la variabilidad de dicha señal que puede -- afectar hasta un determinado grado la variable de interés. Dado el comportamiento de filtro de la cuenca, atenuando las fluctuaciones de los datos de entrada de alta frecuencia (temporalmente), y de altos valores del número de onda (espacialmente), la variabilidad de las señales de salida pueden ayudar a determinar los intervalos de muestreo de la precipitación en el tiempo y en el espacio.

EAGLESON (1967) considera a la precipitación en un punto como una variable aleatoria homogénea a ser muestreada espacialmente y al máximo valor de la altura de precipitación como el pico de curvas isoyéticas isosimétricas. De este modo, un plano vertical que pase por el pico de origen a una función que relaciona alturas de precipitación versus distancias a la cual se determina su autocorrelación, $\rho_t(d)$, que define la relación entre el valor de la función en una posición $f(x)$ con su valor después de un desplazamiento d , $f(x+d)$, en la siguiente forma:

$$\rho_t(d) = \frac{1}{L} \int f(x) f(x+d) dx \quad (8)$$

L viene a ser la longitud de onda de la función altura de precipitación versus distancia. Normalizando la autocorrelación, utilizando el valor de la función sin desplazamiento $|\rho(d)|$, se obtiene el espectro de la densidad de energía de la relación entre las funciones de autocorrelación y distancias, del cual se puede definir un radio de correlación r_0 , como la distancia a la cual, el valor de la autocorrelación normalizada decae a 0,5. Así mismo se calcula el valor de un factor α_0 , definido como la distancia que encierra el 99% del espectro de densidad de energía y que se relaciona con el radio de correlación mediante un coeficiente K_0 . El espaciamiento entre pluviómetros, L_0 , se calcula muestreando dos veces en la más pequeña longitud de onda, utilizando el coeficiente K_0 como número de onda:

$$L_0 = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{K_0} \quad \text{ó también} \quad (9)$$

$$L_0 = \frac{\pi r_0}{\alpha_0}$$

Algunas veces se recomienda usar como limite para Lo el 95% (EAGLESEN, 1969 ; CORONADO 1974).

En la práctica, el método puede simplificarse determinando la autocorrelación de la función de precipitación mediante el uso de funciones no continuas, es decir, representaciones geométricas simples como cuadrados, rectángulos y triángulos.

3.5. METODO DE RODRIGUEZ ITURBE Y MEJIA - RIM.

Rodriguez Iturbe y Mejía (1974) formularon un método para el diseño de redes pluviométricas en el tiempo y en el espacio, expresando la bondad de la red en términos de la reducción de la varianza, expresando ésta última como una función de la correlación en el tiempo y en el espacio, de la longitud del período de observación y de la geometría de la cuenca. La varianza de la precipitación media sobre el área, ya sea para un evento (tormenta) ó a lo largo de un período (mes, año, etc), se reduce mediante dos factores como se indica a continuación:

$$\text{Var } \bar{P} = \sigma_P^2 [F1 (t)] [F2 (N)] \quad (10)$$

Donde:

Var P = Varianza de la media regional de precipitación

σ_P^2 = Varianza puntual de la precipitación observada

F1 (T) = Factor de reducción debido al muestreo en el tiempo; independientemente del número de estaciones, N, función de la correlación en el tiempo y del período de operación de la red.

F2 (N) = Factor de reducción debido al muestreo en el espacio, es una función de la correlación espacial, de la configuración del muestreo y del número de estaciones.

./...

En lo que respecta al factor $F_2(N)$, el muestreo puede ser aleatorio o estratificado; siendo el primero de mayor aplicabilidad para las redes pluviométricas. En este último caso, el método RIM analiza las dos posibilidades siguientes:

a) MUESTREO A LARGO PLAZO.

$$F_2(N) = \frac{1}{N^2} \left\{ N + N(N+1) E(\rho) \right\} \quad (11)$$

Donde:

$E(\rho) = E \left[r(X_i - \bar{X}_i) / A \right]$ = Valor esperado de la correlación entre 2 puntos ubicados al azar sobre el área A.

$$E(\rho) = \int_0^R r(v) f(v) dv \quad (12)$$

$r(v)$ = Función de correlación espacial supuesta homogénea e isotrópica.

$f(v)$ = Función de frecuencia de la distancia v entre dos puntos elegidos al azar en el área A.

R = La mayor distancia.

b) PARA UN SOLO EVENTO.

$$F_2(N) = [1 - E(\rho)] / N \quad (13)$$

$E(\rho)$ tiene la misma equivalencia que en la ecuación (11). Rodríguez Iturbe y Mejía (1974) usan para la correlación espacial la función exponencial siguiente:

$$r(v) = e^{-hv} \quad (14)$$

./...

Donde:

v = Distancia entre dos puntos cualquiera

h = Parámetro de correlación calculado a la distancia característica, D , para el área en cuestión (factor de decrecimiento de la función).

Cuando se trata de sucesos aislados, Rodriguez Iturbe y Mejía (1974) - han demostrado que el parámetro h es sensible a la intensidad de la tormenta, habiendo encontrado los siguientes valores realísticos.

<u>LLUVIAS EN PULGADAS</u>	<u>VALOR DE H</u>
5	0,080
2	0,200
0,75	0,533

En el caso de muestreo a largo plazo, el cálculo de h requiere del conocimiento de la distancia característica, D , definida en base a la geometría de la cuenca de acuerdo a la siguiente relación:

$$D = \frac{d}{d_u} \quad (15)$$

Donde:

d = Diagonal del rectángulo equivalente de área A

d_u = Diagonal de un rectángulo unitario con la misma proporción de lados que el área A

γ = Distancia media entre dos puntos elegidos al azar dentro del área unitaria

El valor de γ ha sido calculado por MATERN (1960) para diferentes formas geométricas: círculo, 0,518; hexágono, 0,5126; cuadrado, 0,5214; triángulo equilátero, 0,5544. Para rectángulos con una proporción de lados --

igual a α , se obtiene la siguiente relación:

$$\gamma = 0,4737 + 0,0477 \alpha \quad (16)$$

Conociendo D, se calcula h de (14) haciendo $v=D$.

Para la función de distribución de distancias, el método RIM utiliza la expresión derivada por GHOSH (1951). Denominando S a la región de estudio, A y P son el área y Perímetro respectivamente. Cuando S es un rectángulo de lados A1 y A2, la función de frecuencia $f(v)$ toma la siguiente expresión:

$$f(v) = \frac{1}{A^{1/2}} f \left[\frac{v}{A^{1/2}}, (A1/A2)^{1/2} \right] \quad (17)$$

Siendo V la distancia entre dos puntos.

Tanto GHOSH (1951) como Rodríguez Iturbe y Mejía (1974) usan las siguientes limitaciones:

$$f(w, a) = 2 w \left[f_1(w, a) + f_2(wa, a) + f_2(w/a, 1/a) \right] \quad (18)$$

Donde:

$$f_1(w, a) = \pi + w^2 - 2 w (a + 1/a)$$

para $0 < w < (a^2 + \bar{a}^2)^{1/2}$

De otro modo, $f_1(w, a) = 0$

$$f_2(w, a) = 2 (w^2 - 1)^{1/2} - 2 \cos^{-1} (1/w) - \bar{a}^2 (w-1)^2$$

para $1 < w < (1+a^4)^{1/2}$

De otro modo, $f_2(w, a) = 0$

Tomando en cuenta las limitaciones expuestas y reemplazando las ecuaciones (14) y (17) en la (12) se obtiene:

$$E(P) = \frac{2}{A} \int_0^R v e^{-hv} \left[\pi + \frac{v^2}{A} - 2v (1/A_1 + 1/A_2) \right] dv +$$

./...

$$4 \left\{ \sum_{\substack{i, \gamma=1, 2 \\ i \neq \gamma}} \left(\frac{A_i}{A_\gamma} \right)^{R/A_i} x e^{-h A_i x} \left[(x^2 - 1)^2 - \arccos \frac{1}{x} - \frac{A_i}{2A_\gamma} (x - 1)^2 \right] dx \right\} \quad (19)$$

En esta última ecuación, V varía entre cero y R ; la diagonal del rectángulo y X entre 1 y R/A_i . Las integrales se pueden evaluar numéricamente por el método de simpson.

Tanto el factor de reducción de la varianza debido al muestreo en el tiempo $F_1(T)$, así como aquel debido al muestreo espacial, $F_2(N)$, han sido -- calculados por Rodríguez Iturbe y Mejía (1974), el primero en función del período de observación para diferentes coeficientes de autocorrelación; y el segundo en función del producto Ah^2 para diferente número de estaciones; el último tanto para un evento, como para largos períodos y son presentados en forma gráfica.

3.6. METODO DE HUFF.

HUFF (1970) en sus estudios sobre la variación espacial de la precipitación, indica que las lluvias de tipo inestable características de los meses de verano (similares a las de trópico) es extremadamente variable en el espacio, requiriéndose una densidad de estaciones pluviométricas muy elevada para su descripción. Encontró que el "error promedio de -- muestreo" es directamente proporcional a la precipitación media sobre el área, e inversamente proporcional a la densidad de la muestra y a la duración de la tormenta. En base a la información sobre lluvias recolectada para la región central de Estados Unidos, derivó una ecuación de error, para áreas hasta de 400 millas cuadradas por estación, -- en función de la duración de la tormenta, altura de precipitación y -- densidad de la red:

$$\text{Log } E = - 1.5069 + 0,65 \log P + 0,82 \log G - 0,22 \text{ Log } T - 0,45 \text{ Log } A \quad (20)$$

E = Error promedio de muestreo en pulgadas

P = Precipitación media sobre el área en pulgadas

G = Densidad de la red en millas 2/ Pluviómetro

T = Duración de la tormenta en horas

A = Area de la cuenca en millas cuadradas

El propio HUFF (1970) previene sobre el uso de los resultados indicando que sólo sean interpretados cualitativamente, debido a la variabilidad del gradiente de lluvia y error de muestreo incluso en tormentas de similar volumen y duración.

El estimado de la precipitación mejora cuando se considera un muestreo a largo plazo. Las ecuaciones deducidas por HUFF para este caso son:

a) Lluvia mensual de verano

$$\log E = -1.332 + 0,72 \log P + 0,73 \log G - 0,56 \log A \quad (21)$$

b) Lluvia estacional para los 5 meses de verano

$$\log E = -1.3892 + 0,54 \log P + 0,76 \log G - 0,47 \log A \quad (22)$$

HUFF (1970) presenta la solución de las ecuaciones (20), (21), y (22) en nomogramas, con curvas para cada duración y densidad en función de la lluvia media.

También HERSFIELD (1965) ha establecido nomogramas en Estados Unidos en base a pequeñas cuencas, para estimar la distancia entre estaciones como una función de la lluvia de dos (2) años, tanto horaria como diaria.

Los resultados de estos procedimientos empíricos, pueden ser usados como índices orientadores en el diseño de redes. Combinados con la experiencia y el conocimiento sobre la región que se estudia podrían ser de mucha utilidad para estimar el número adecuado de estaciones que debe tener la red.

3.7. METODO DE LANGBEIN.

LANGBEIN (1954, 1960, 1965) ha sondeado varios criterios teóricos para el diseño de redes hidrológicas, basando su análisis en los concepto de estaciones básicas permanentes y estaciones secundarias de - -

período de observación limitado. Recomienda que las estaciones básicas sean operadas por un período por lo menos igual al mínimo número de -- años requeridos para una interpretación total de las series anuales; - mientras que las secundarias, sólo hasta obtener regresiones aceptables con los datos de las básicas.

La dependencia mútua entre los dos tipos de estaciones para el período común de registro se expresa mediante la siguiente fórmula del error.

$$S_c = \frac{S}{(N-2)^{1/2}} \quad (23)$$

Donde:

S_c = Error de la correlación

S = Desviación estandar al rededor de la regresión

N = Número de datos o eventos disponibles

El valor de S aumenta con la distancia entre las estaciones. El valor de S_c puede entonces limitarse disminuyendo la distancia o incrementando N (período de observación de las estaciones secundarias). La distancia sólo puede reducirse incrementando el número de estaciones principales, lo cual trae consigo una reducción del período N , para igual -- disponibilidad de fondos.

El problema consiste en optimizar la relación binomial número de estaciones principales - período de operación de las secundarias para obtener la máxima información con los fondos anuales disponibles para la -- operación de la red.

Siendo T el período del programa que se pretende desarrollar, para calcular la longitud efectiva N de un registro extendido por regresión, -- LANGBEIN (1954) sugiere la siguiente expresión:

$$N = \frac{T}{1 + \frac{N_e}{N_r - 2} (1 - r^2)} \quad (24)$$

Donde: Ne= Número de años de la extensión

Nr= Período de registro común (estación secundaria)

T = Longitud del registro mayor (= Nr + Ne)

r = Coeficiente de correlación entre ambos registros.

La ganancia en información es N-Nr, la cual se pretende que sea máxima.

LANGBEIN (1960) utiliza una fórmula empírica para relacionar el coeficiente de correlación r con el área A y el número de estaciones principales B en la siguiente forma:

$$1 - r^2 = \frac{0,4 C^2 A}{B} \quad (25)$$

Donde:

A = Area total de la cuenca

B = Número de estaciones básicas

C = Incremento en el error estandar del estimado de la correlación por cada Km de aumento en la distancia entre las estaciones. LANGBEIN recomienda usar incrementos de 0,01.

Usando las ecuaciones (24) y (25) se pueden calcular los valores de Nr y B por aproximaciones sucesivas, en tal forma de maximizar la ganancia de información.

3.8. METODO DE LAS IMAGENES SATELITARIAS - EARTHSAT.

Con el adelanto logrado en la aeronáutica y en las telecomunicaciones, es posible estimar los errores en el cálculo de la precipitación mediante el uso de los satélites.

Actualmente hay muchos satélites meteorológicos que pueden proporcionar valiosa información para los estudios hidrológicos; la mayoría de ellos es operada por la NOAA (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION) y usan el sistema APT (automatic PICTURE TRANSMISSION).

El método que usa EARTHSAT para estimar la precipitación zonal a partir de las imágenes producidas en las estaciones repetidoras, se basa en las técnicas de "calibración" de tipos de nubes y su "potencial de lluvia" - (SABATINI, 1975). La cobertura de nubes es captada por la imagen satelitaria. La calibración estadística se logra de un juego de datos de muestra de dichas imágenes. El procedimiento es automático y permite elaborar mapas esoyéticos para períodos definidos, como paso intermedio.

Las células meteorológicas que usa el satélite son aproximadamente de -- 22 x 25 millas. Hay dos tipos de imágenes las que proporcionan la siguiente información:

- a) Imágenes visibles: Proporcionan siete (7) clases de cobertura nubosa.
- b) Imágenes infrarrojas: Proporcionan dos (2) clases de brillantez de cobertura nubosa

La información de a) y b) se codifica en tarjetas. El computador define a la célula por sus coordenadas, con lo que se encuentran en memoria los datos necesarios para calcular la precipitación (u otro parámetro).

La calibración del sistema se efectúa correlacionando la información sobre cobertura nubosa del satélite con los reportes terrestres de precipitaciones medidas, usando ecuaciones del tipo general siguiente:

$$Ps = K1 C_n + K2 C_c + K3 N_s + K4 St + K5 B1 + K6 B2 \quad (26)$$

Donde:

- Ps = Precipitación estimada por el satélite
- Cn = Porcentaje de cumulo - Nimbos
- Cc = Porcentaje de cumulos conglomerados
- Ns = Porcentaje de Nimbo - estratos
- St = Porcentaje de nubes en estratos
- B1 = Porcentaje de ocurrencia más brillante de cobertura en infrarrojo
- B2 = Porcentaje de ocurrencia brillante de cobertura en infrarrojo
- K1, K6 = Parámetros de regresión estimados en la calebración.

MARTIN Y SCHERER (1973) indican que es posible lograr precisiones del orden de 30 al 50% en la estimación de lluvias de 12 horas para áreas entre 1000 y 10000 Km².

El error total medio $\bar{A}\bar{P}$, para un lapso conformado por n períodos de 12 horas, es función de los errores individuales, A_{Pi} , y se puede expresar como la raíz cuadrada de la varianza de la precipitación media, P :

$$(\bar{A}\bar{P})^2 = \text{Var } \bar{P} = \frac{1}{\sum_1^n (1/A_{Pi})^2} = \left[\sum_1^n (1/A_{Pi})^2 \right]^{-1} \quad (27)$$

Para el caso de la precipitación mensual, se efectúan acepciones sobre el número de lluvias por mes, n , la altura de precipitación de cada una y el promedio del mes.

SABATINI (1975) indica que las imágenes satelitarias también pueden usarse en combinación con las observaciones terrestres. En efecto, si se dispusiera de un número n de estimaciones independientes de un parámetro χ_i , cada una con su error asociado $\Delta \chi_i$, la media de las estimaciones sería:

$$\bar{U} = \frac{\sum_1^n (\chi_i / \Delta \chi_i^2)}{\sum_1^n (1 / \Delta \chi_i^2)} \quad (28)$$

A \bar{U} se le denomina a menudo media ponderada. En el caso que se analiza, se trata de dos estimaciones independientes:

- Una por satélite, P_s , con su error ΔP_s
- Otra terrestre, P_g , con su error ΔP_g

De acuerdo a la ecuación (28) la precipitación media, \bar{P}_{sg} será:

$$\bar{P}_{sg} = \frac{P_g / (\Delta P_g)^2 + P_s / (\Delta P_s)^2}{1 / (\Delta P_g)^2 + 1 / (\Delta P_s)^2} \quad (29)$$

Usando la ecuación (27) se calcula el error $\Delta \bar{P}_{sg}$ asociado a la precipitación media \bar{P}_{sg} :

$$(\Delta \bar{P}_{sg})^2 = \text{Var } \bar{P}_{sg} = \left[(1/\Delta P_s)^2 + (1/\Delta p_g)^2 \right]^{-1} \quad (30)$$

El uso de satélites encuentra mayor aplicación en las estimaciones a largo plazo, especialmente cuando se trata de estudios preliminares en regiones de poco acceso. Sin embargo, los satélites requieren de la implementación de estaciones repetidoras para la captación de las imágenes.

3.9. CRITERIOS ECONOMICOS PARA LA EVALUACION DE LA RED HIDROMETEOROLOGICA.

En el pasado, ha habido la tendencia de evaluar los datos hidrológicos en términos de su precisión estadística solamente; actualmente se ha reconocido que la recopilación de la información básica ya no constituye sólo un fin en sí misma, sino que sirve para usos múltiples, cuyos requerimientos deberían gobernar los principios de diseño de la red, prestando atención al hecho de que su mejoramiento debe evaluarse en términos de los beneficios económicos que ha de producir.

Ya se mencionó que el problema principal es saber cuán adecuados o inadecuados son los datos. Una forma de enfocarlo podría ser el de definir las consecuencias de los niveles de incerteza para los objetivos del uso de la información. Los objetivos principales vienen a ser el diseño de las obras hidráulicas para control de inundaciones o embalses de regulación del caudal. Dichas obras pueden ser evaluadas en términos del error de predicción de los parámetros de diseño, considerando que los datos son adecuados cuando los costos marginales asociados con el mejoramiento de la red (reducción del error de predicción) sean iguales a los beneficios marginales de esa mejora.

Lo que se requiere es entonces establecer una relación de costos entre el estado actual y el mejoramiento de la red. Los beneficios se reflejan como un ahorro en el costo de las obras hidráulicas al evitar un sobre diseño, o ahorro en forma de valor presente esperado de los pro--

bables daños futuros en caso de un subdimensionamiento debido al uso de datos inadecuados.

Las relaciones Costo-Mejoramiento y Beneficio-Mejoramiento pueden ser combinadas para determinar lo conveniente de la red hidrometeorológica.

En este capítulo se presenta un resumen del método propuesto por WATT y WILSON (1973) y WILSON (1972) para evaluar los datos hidrológicos desde el punto de vista económico.

Cuando el objetivo es control de inundaciones, los parámetros de diseño--son la magnitud de la crecida y su período de retorno. La decisión de construir una estructura pequeña, de bajo costo, resulta en una alta probabilidad de falla. Inversamente se pueden disminuir los daños probables con una mayor inversión en obras más grandes. La decisión óptima será la selección del caudal de diseño que maximice el valor presente neto, vale decir minimice los valores presentes de los costos de capital y mantenimiento, C1, más el valor presente esperado de los costos de probables daños, C2. Este criterio es netamente económico.

Cuando el objetivo es el almacenamiento para regulación del caudal, también se presentan dos alternativas: Diseño para un volumen reducido, con costos pequeños de capital, en cuyo caso, podrían ocurrir déficits anuales en la oferta (costos de no poder suplir la demanda); y diseño para grandes volúmenes, con elevadas inversiones de capital, y pérdida de beneficios debido al exceso de capacidad: en relación con la demanda real. El óptimo se encuentra entre ambos extremos, donde el costo total es mínimo, es decir, la suma de los costos de capital, C1 y el valor presente esperado de los costos futuros, C2.

Para uniformizar el análisis en los dos tipos de estructuras, es necesario--introducir una variable S, definida como el alcance del proyecto. En las estructuras de control de inundaciones el alcance será el caudal pico más una constante; para las obras de embalse, el volumen de almacenamiento más una constante.

Los costos de capital, C1 (construcción y mantenimiento) pueden expresarse --adecuadamente en la siguiente forma:

$$C1 = K1 S^m \quad (\text{con } m < 1) \quad (31)$$

Los costos de pérdidas futuras, C2, se definen como el valor presente de futuras pérdidas y pueden ser definidos de acuerdo a la ecuación (32), la cual se basa en el criterio adoptado por BENSON (1967) de que los costos de daños computados para crecidas con período de recurrencia 2T son una buena aproximación del daño promedio para todas las crecidas con retornos mayores de T años.

$$C2 = \frac{f(i) K [S(2T)]^r}{2T} \quad (32)$$

f(i) = Función de la tasa de interés

S(2T) Alcance del proyecto, cuyo período de retorno es igual al doble del alcance de diseño.

El alcance y el período de retorno se relacionan mediante la curva regional de frecuencias, la cual puede ser aproximada para rangos medios (10-100 años) de acuerdo a WILSON (1972) mediante la siguiente expresión:

$$S = A T^{1/q} \quad (33)$$

Donde: A = Coeficiente que depende del área y otros parámetros a ser evaluado para cada proyecto.

q = Exponente sujeto a regionalización.

Sustituyendo el valor de T de (33) en (32) se obtiene:

$$C2 = K2 S^{-n} \quad (34)$$

Con:

$$\begin{aligned} n &= q - r \\ K2 &= f(i) K A^{q/2} (r - q)/q \end{aligned} \quad (35)$$

Para determinar el alcance óptimo, So, se deriva e iguala a cero la suma de las ecuaciones (31) y (34):

$$C = C1 + C2 \quad (36)$$

$$So = \left[\frac{n K 2}{m K 1} \right]^{1/(m+n)} \quad (37)$$

El costo asociado, C_o , en el punto óptimo, se obtiene de la ecuación (36) sustituyendo por S_o los valores de C_1 y C_2 :

$$C_o = \left[1 + \frac{m}{n} \right] \left[K_1^n \left(\frac{n}{m} K_2 \right)^m \right]^{1/(m+n)} \quad (38)$$

Una práctica muy común consiste en representar la relación Alcance - Costo en forma adimensional, haciendo:

$$C_r = C/C_o$$

$$S_r = S/S_o$$

Con lo cual C_r será:

$$C_r = \frac{n}{n+m} \left[S_r^m + \frac{m}{n} S_r^{-n} \right] \quad (39)$$

Esta última ecuación se usa para establecer la relación requerida entre el error de predicción en los estimados de los parámetros de diseño y el incremento en el costo de las estructuras hidráulicas.

La imprecisión de datos hidrológicos ocasiona errores de estimación en el alcance del diseño óptimo. Sin embargo, el costo C_1 no se considera afectado por la calidad de la información. Por lo tanto, los errores en S_o pueden ser ocasionados sólo como consecuencia de la imprecisión de T^{-1} en la ecuación (32). El error proporcional en T puede ser estimado en términos del error de estimación en S , por diferenciación de la ecuación (33), vale decir:

$$\frac{dT}{T} = q \frac{ds}{s} \quad (40)$$

Haciendo $ds/s = E_s$, el error proporcional en C_2 será $q E_s$. Si se incluye el término de error $(1 \pm q E_s)$ en C_2 , la ecuación (37) para el alcance máximo será:

./...

$$S_o = \left[\frac{n K_2}{m K_1} \right]^{1/(m+n)} (1 \pm q E_s)^{1/(m+n)} \quad (41)$$

Denominando E_{so} el error proporcional en S_o . y despreciando términos elevados en la expansión binomial se obtiene:

$$E_{so} = \frac{q}{m+n} E_s \quad (42)$$

Sustituyendo n en la última ecuación se logra:

$$E_{so} = \frac{q}{q + (m-r)} E_s \quad (43)$$

La ecuación (43) muestra que el error en S_o es igual a la estimación del error en S , siempre que el exponente m de los costos de construcción sea igual al exponente r de los costos de daños para un evento dado.

Usando las ecuaciones (39) y (43) se determina el incremento relativo en costo, $E_c = C_r - 1$, que resultaría de seleccionar un alcance de diseño diferente al óptimo, reemplazando E_{so} por $S_r - 1$. Sin embargo, cuando S_r es cercano a la unidad, la relación $E_c - E_{so}$ puede determinarse de la ecuación (39). Si se asume que cerca del punto óptimo se puede aplicar para la relación $C_r - S_r$ la siguiente ecuación parabólica:

$$C_r - 1 = \frac{1}{2} \frac{d^2 C_r / d S_r^2}{S_r=1} (S_r - 1)^2 \quad (44)$$

Por diferenciación de la ecuación (39) se obtiene:

$$\left. \frac{d^2 C_r / d S_r^2}{S_r=1} \right| = m n \quad (45)$$

Sustituyendo E_c por $C_r - 1$; E_{so} por $S_r - 1$ y la ecuación (45) en (44) se obtiene:

$$E_c = \frac{m n}{2} E_{so}^2 \quad (46)$$

./...

Eso se calcula con la ecuación (42) si fuera necesario. Sin embargo, cuando $r = m$, Eso es igual al error en el caudal E_s , como se ha mencionado más arriba.

La aplicación práctica del análisis económico descrito está fuera del alcance del presente trabajo, su descripción teórica ha sido incluida para mostrar la importancia que posee en la planificación de las redes hidrometeorológicas.

4.- DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLOGICA PARA LA CUENCA DEL RIO CAURA.

4.1. DESCRIPCION GENERAL DE LA CUENCA.

El Río Caura es un afluente del Orinocó por la margen derecha y su cuenca se extiende hacia el sur en una longitud de unos 600 Km hasta la frontera con el Brasil drenando un área aproximada de 55000 Km². Una orografía de altas montañas bordea la cuenca de Sur a Oeste en tanto que relieves secundarios formados por colinas la dividen en escalones planos que presentan un típico microrelieve celular. El accidente topográfico natural más importante, el Salto Para, ubicado a la altura del paralelo 6° N, divide a la cuenca en dos zonas (Ver Figura 1):

- a) La zona baja al norte de Salto Para que se caracteriza por ser un área plana y baja, de poco aporte fluvial, cubierta por sabanas y bosques.
- b) La zona alta al Sur de Salto Para, presenta el aspecto de una penillanura enmarcada en su parte superior por grandes tepuis.

El sistema de drenaje primario lo conforman dos ríos principales, el Alto-Caura y el Erebató, los cuales corren en dirección Sur - Norte, siguiendo el rumbo del sistema estructural predominante.

La cuenca del caura constituye uno de los más importantes potenciales hídricos del país y una valiosa reserva de recursos naturales cuyas posibilidades de desarrollo plantean un reto a la ingeniería.

4.2. METODO DE LA WMO.

Como primera aproximación, se aplicaron los criterios recomendados por la WMO, dividiendo, para el efecto, el área de la cuenca en dos zonas, a y b, equivalentes a las descritas en el punto anterior -- (4-1). Se consideró a la zona b como montañosa. Además se tomaron -- las dos alternativas siguientes en relación con las condiciones que se presentan en la cuenca:

CN = Condiciones normales

CD = Condiciones difíciles y extremadamente difíciles.

Bajo las consideraciones expuestas, se calcularon los rangos para -- el número de estaciones pluviométricas, hidrométricas y evaporimé-- tricas, para cada zona y ambos tipos de condiciones. Los resultados se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. REQUERIMIENTOS MINIMOS ESTIMADOS PARA LA RED HIDROMETEORO-- LOGICA EN LA CUENCA DEL RIO CAURA.

ZONA	AREA Km ²	NUMERO DE ESTACIONES					
		PLUVIOMETRICAS		HIDROMETRICAS		EVAPORIMETRICAS	
		CN	CD	CN	CD	CN	CD
a	29000	32-48	10-32	12-29	3-10	2	1
b	26000	104-200	26-104	26-87	5-26	2	1
a+b	55000	61-92	18-61	22-55	6-18	4	2

La acepción hecha sobre la zona b, clasificándola como montañosa no se ajusta exactamente a la realidad. Los viajes de reconocimiento efectuados sobre dicha región y el análisis de la información cartográfica disponible indican que sólo de un 15 al 20% de esa área está constituida por --

montañas, las cuales se presentan como grandes mesetas en forma de discontinuidades abruptas dentro de la penillanura (denominadas tepuis). - Por ello, un estimado más realístico consiste en considerar toda el área de la cuenca como una región plana, despoblada, teniendo especial cuidado de ubicar algunos puntos de observación en las mesetas más elevadas - (Jaua, Sarisariñama, etc). Sin embargo, por la inaccesibilidad y dificultad de desplazamiento, la cuenca presenta condiciones extremadamente-difíciles, tanto para la implementación, como para la operación de la red.

En base a estas nuevas consideraciones, la aplicación de los criterios de la WMO, arroja para la cuenca del río Caura los siguientes valores:

<u>TIPO DE ESTACION</u>	<u>NUMERO DE ESTACIONES</u>
Pluviométricas	18-61
Hidrométricas	6-18
Evaporimétricas	2-4

Como se puede apreciar, los rangos son muy grandes, creando una dificultad adicional en la selección del número exacto de estaciones. Una forma de enfocar el problema consiste en ubicar las estaciones de acuerdo a las necesidades de información y al conocimiento de cada subcuenca, estableciendo así el número de estaciones. Este valor se compara con los rangos obtenidos por el método de la WMO.

El autor tuvo la oportunidad de aplicar este último criterio en el diseño de una red preliminar efectuado por OCOIDESA (1979) a pedido de CADAFE para fines de aprovechamiento hidroeléctrico y de usos múltiples de los recursos hídricos de la cuenca. En aquella oportunidad se llevó a cabo un reconocimiento aéreo de todas las subcuencas y un análisis de la información cartográfica, para establecer la ubicación de las estaciones en tal forma de determinar las características hidrometeorológicas de cada subcuenca. Las subcuencas consideradas fueron los ríos NICHARE, MATO, EREBATO, CACARO, YUDI, MEREVARI, ALTO CAURA , y CAURA PRINCIPAL (Ver figura 1). Las estaciones hidrométricas fueron clasificadas en las dos siguientes categorías:

- Primera prioridad, para la recolección de información básica para el estudio de aprovechamientos hidroeléctricos.
- Segunda prioridad, como complemento de las primeras que proporcionarán datos para otros usos.

Las estaciones pluviométricas fueron consideradas, conjuntamente con las hidrométricas de primera prioridad, como lo más importante de la red hidrometeorológica; y su ubicación fué seleccionada en tal forma de que cada subcuenca tuviera por lo menos dos puntos de observación uno en la parte baja y el otro en la parte alta; además también se consideraron como sitios de muestreo las mesetas elevadas de la parte alta de la cuenca.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el trabajo de OCOIDESA (1979), mediante el procedimiento descrito, denominado empírico.

Tabla 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA RED HIDROMETEOROLOGICA POR EL METODO EMPIRICO.

TIPO DE ESTACION	PRIORIDAD	NUMERO DE ESTACIONES			DENSIDAD Km ² /Est.
		EXISTENTES	PROYECTADAS	TOTAL	
Hidrométricas	Primera	3	6	9	6111
Hidrométricas	Segunda		5	5	11000
Hidrométricas	Ambas	3	11	14	3928
Pluviométricas	Primera	12	18	30	1833
Evaporimétricas	Primera	3		3	18333
Evaporimétricas	Segunda		5	5	11000
Evaporimétricas	Ambas	3	(5)	(8)	6875

En la Tabla 5 se comparan los totales obtenidos en la Tabla 4 con los valores que arroja el método de la WMO.

TABLA 5.- Resumen de los resultados contenidos en el diseño de la red hidrometeorológica para el Caura.

TIPO DE ESTACION	NUMERO DE ESTACIONES	
	METODO WMO	METODO EMTRICO
Pluviométricas	18-61	30
Hidrométricas	6-18	14
Evaporimétricas	2-4	8 (3)

Como es de apreciar, los valores obtenidos mediante el método empírico se encuentran comprendidos en el rango establecido por el procedimiento WMO. Esto indica que el programa de implementación de la red de estaciones proyectado en base a la división en subcuencas es adecuado para cumplir con las condiciones mínimas de densidad.

4.3 METODO DE KAGAN.

A continuación se resume el procedimiento empleado en la aplicación del método de correlación espacial.

- a.) Se seleccionó como información básica los datos de lluvias mensuales de las 8 estaciones que disponen de información consistente. Se adaptó como período de análisis los meses de abril-septiembre 1969-1974.
- b.) Se calcularon los coeficientes de correlación cruzada entre estaciones y las distancias entre ellas. Los resultados se presentan en la Tabla 6.
- c.) Se clasificaron los coeficientes de correlación para rangos de distancia de 30 Km, calculándose los promedios correspondientes, como se indica en la Tabla 7.
- d.) Con los datos de la Tabla 7 se estableció la función de correlación espacial teórica dada en la ecuación (1), capítulo 3.3, de la cual se obtuvieron los parámetros $P(0)$ y d_0 . El Ajuste teórico por el método de los mínimos cuadrados dió como resultado:

TABLA 6 MATRIZ DE CORRELACION ESPACIAL Y DE DISTANCIAS ENTRE ESTACIONES EN LA CUENCA DEL CAURA

ESTACIONES	AURORA	MARI PA	LTRINCHERAS	PSALTO	ERIOS	CEIATO	SMAEREBATO	GUATISIMIÑA	MEDIA (mm)	
									(ABR-SET)	
AURORA	0-1	0.88	0.81	0.64	0.54	0.56	0.47	0.46	185	
MARI PA	23	0-1	0.93	0.72	0.66	0.70	0.47	0.48	211	
LTRINCHERAS	62	46	0-1	0.81	0.81	0.75	0.58	0.50	214	
PSALTO	150	134	89	0-1	0.82	0.74	0.67	0.55	340	
ERIOS	200	182	138	50	0-1	0.79	0.68	0.55	365	
CEIATO	243	226	181	93	44	0-1	0.47	0.84	329	
SMAEREBATO	292	272	232	155	115	86	0-1	0.84	448	
GUATISIMIÑA	351	333	288	199	151	107	109	0-1	411	
MATRIZ SUPERIOR: COEFICIENTES DE CORRELACION MATRIZ INFERIOR: DISTANCIAS ENTRE ESTACIONES EN Km PERIODO DE ANALISIS: ABR- SET AÑOS 1969- 1974									\bar{P} σ Cv	313 99 0.32

Tabla 7. DATOS BASICOS DE LA FUNCION DE CORRELACION ESPACIAL PARA LA CUENCA DEL RIO CAURA.

RANGO	Nº DE CASOS	d (Km)	ρ
0-30	1	23	0,88
30-60	3	47	0,85
60-90	3	75	0,61
90-120	4	106	0,78
120-150	3	141	0,72
150-180	3	152	0,46
180-210	4	191	0,63
210-240	2	229	0,64
240-270	1	243	0,56
270-300	3	284	0,48
300-330	-	-	-
330-360	2	342	0,47

$$\log \rho = - 0,0226 - 9.1 \times 10^{-4} d \quad (47)$$

$$\tau = 0,99$$

Expresando la ecuación (47) en forma exponencial se obtiene:

$$\rho (d) = 0,96 e^{-0,0021 d} \quad (48)$$

También se efectuó un ajuste gráfico, utilizando papel similogarítmico, tal como se muestra en la Figura 2.

e) Conociendo los parámetros $\rho(0)$, d_0 y el área de la cuenca, A , se usaron las ecuaciones (5) para determinar $Z1(d)$; (8) para $Z3(d)$ y (7) para el espaciamiento considerando una distribución triangular. Los resultados obtenidos para el error relativo de la precipitación media sobre la cuenca, $Z1$; error de interpolación espacial, $Z3$ y espaciamiento entre pluviómetros L , se presentan en la Tabla 8, para diferente número de estaciones.

En busca de una interpretación gráfica de los resultados obtenidos, éstos se plotearon en la Figura 3.

Observando los resultados presentados en la Tabla 8 y en la Figura 3, se puede apreciar que tanto $Z1$, como $Z3$ disminuyen rápidamente con el incremento de n hasta un valor de 30. Esto significa que un aumento en el número de estaciones por encima de 30 no se justifica en función de la disminución del error ya que ésta no es significativa. Aunque KAGAN (1966) recomienda establecer como límite de error un valor mínimo de 10%, parece más práctico enfocar la selección del número de estaciones en función del decrecimiento del error.

4.4. METODO DE EAGLESON.

El procedimiento seguido para este caso fue el que se indica a continuación:

a) Se adoptó como período de análisis el mes de Julio y como variable, la precipitación media para dicho mes, de los años 1969-1974. Se asumió como dirección más probable del movimiento de las tormentas a un eje que naciendo en la parte alta de la cuenca sigue el curso del sis

Tabla 8. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL METODO DE KAGAN.

NUMERO DE ESTACIONES	PARAMETROS DE ERROR EN %		ESPACIAMIENTO, Km. L
	Z1	Z3	
2	7.7	13.9	178
5	4.3	11.3	112
10	2.8	9.7	79
20	1.8	8.4	56
30	1.4	7.7	46
40	1.2	7.3	40
50	1.1	7.0	36
60	0,96	6.8	32
70	0,88	6.6	30
80	0,82	6.5	28
90	0,77	6.3	26
100	0,72	6.2	25

tema de drenaje principal.

- b) Tomando como punto de origen la desembocadura del río Caura en el Orinoco, se dibujó la curva de altura de precipitación en base a los puntos en que el eje corta a las isoyetas, u obtenidos de las proyecciones de los registros sobre dicho eje. El resultado de la función precipitación - elevación se presenta en la Figura 4.
- c) Se estableció la función de autocorrelación de la curva tipo, recurriendo a formas geométricas simples como triángulos (I, III, V en la Figura 4) o rectángulos (II y IV en la Figura 4).
- d) Luego de normalizar la función de autocorrelación en cada caso, se determinó el espectro de densidad de energía del cual se obtuvieron los valores para los parámetros γ_0 y λ_0 considerando para este último un nivel de 95% de dicho espectro. El espaciamiento entre pluviómetros se calculó utilizando la ecuación (9) (capítulo 3.4).

Los resultados obtenidos mediante el método d EAGLESON se resumen a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9, Espaciamiento entre pluviómetros calculado por el método de EAGLESON.

SECCION	LONGITUD DE ONDA	PARAMETROS		ESPACIAMIENTO (Km)
	L	γ_0	λ_0	L_0
I	206	72	7	32
II	154	77	8	30
III	55	19	2	30
IV	49	25	2,5	31
V	46	16	1,5	34

Este método arroja para el espaciamiento entre pluviómetros un valor que varía entre 30 y 34 Km, lo cual indica al rededor de 50 estaciones considerando una distribución triangular, magnitud comprendida -- dentro del rango calculado por el método WMO.

Si se considera que, especialmente en el caso de regiones planas como la cuenca del Caura, el método usa un factor de corrección mayor que la unidad para aumentar el espaciamiento (EAGLESON, 1967; CORONADO -- 1974) se encuentran resultados concordantes con los obtenidos anterior_{mente}.

4.5. METODO RIM.

Para aplicar este método, se utilizó la función de correlación espacial establecida para el procedimiento de KAGAN, transformándola en tal forma de obtener una expresión equivalente a la ecuación (14). Luego se -- aplicó el procedimiento indicado en el punto 3.5, obteniéndose la si--- guiente información básica.

$$A = 55000 \text{ Km}^2 \text{ (Área de la cuenca)}$$

$$\lambda = 4 \text{ (Factor de proporcionalidad de lados del rectángulo equi- valente en área a A.)}$$

$$\gamma = 0,7137 \text{ (distancia media en el área unitaria)}$$

$$d = 483,5 \text{ (diagonal del rectángulo)}$$

$$d_u = 2,062 \text{ (diagonal del rectángulo unitario de igual proporción de lados).}$$

$$D = 167.3 \text{ Km (distancia característica)}$$

$$\rho(D) = 0,67 \text{ (correlación a la distancia D)}$$

$$h = 0,00234 \text{ (Factor de decrecimiento de la función dada en la -- ecuación (14))}$$

$$\rho(t) = 0 \text{ (Coeficiente de autocorrelación)}$$

./...

RODRIGUEZ ITURBE Y MEJIA (1974) indican que la estructura temporal de la función de correlación puede ser aproximada por el proceso MARKOVIANO de primer orden. Además, se ha encontrado que el coeficiente de autocorrelación de primer orden siempre es menor que ---- 0,25. En el presente estudio se adoptó un valor igual a cero. RODRIGUEZ ITURBE Y MEJIA (1974) usaron el mismo valor para el Estado Portuguesa en la demostración del método. COMPROSA (1979) usó un valor de 0,15 para la cuenca del Río Caroní. La comparación de los resultados usando valores de cero y 0.15 no dió diferencias significativas en el caso del Caura, por lo que se adoptó $\rho(t) = 0$.

En la Tabla 10 se muestran los porcentajes de la disminución de la -- varianza de la precipitación media como una función de un incremento en el número de estaciones y en el número de años de observación, ba sados en las 9 estaciones pluviométricas y los 5 años de datos - - - (1969 - 1974). Se supuso que el muestreo en el espacio fue efectuado en forma aleatoria. Los valores de $F_1(T)$ y $F_2(N)$ fueron obtenidos - de las Figuras 5 y 6, tomados de COMPROSA (1979).

TABLA 10. PORCENTAJE DE REDUCCION DE LA VARIANZA EN LA ESTIMACION DEL PRO-
MEDIO A LARGO PLAZO EN LA CUENCA DEL RIO CAURA.

NUMERO DE ESTACIONES ADICIONALES	NUMERO DE AÑOS DE REGISTRO ADICIONALES			
	0	10	20	100
1	0	89	92	99
10	15	91	93	99
20	17	91	93	99
100	20	91	93	99

./...

Los valores de la Tabla 9 indican que el incremento en el número de años de observación tiene mayor influencia en la disminución del error que el incremento en el número de estaciones. Sin embargo, dicho efecto tiende a estabilizarse para períodos mayores de 10 años. Esto indica que es posible intercambiar tiempo -- con espacio, aunque el número de estaciones adicionales requeridas aumenta rápidamente para pequeñas variaciones en el nivel de reducción de la varianza.

Para el caso del Caura, con la implementación de 20 estaciones adicionales (con un total de 30) y un período de registro adicional de 10 años, se obtiene una reducción de la varianza de más del 90%, lo cual constituye un objetivo mínimo factible de lograr.

Si se tiene presente que el análisis efectuado sólo se basa en 5 años de datos, es de esperar que los resultados obtenidos se ubican al lado de la seguridad en el diseño.

Si se comparan los valores obtenidos con los correspondientes a los otros métodos se observa, que todos ellos poseen un elevado grado de concordancia, indicando a la vez que el programa propuesto para el mejoramiento de la red hidrometeorológica en la cuenca del Caura es el adecuado. Sin embargo, no se debe perder -- de vista los aspectos de ubicación física de las estaciones y calidad en la instalación y operación de las mismas.

4.6 METODO DE HUFF

Se utilizó la ecuación (22) desarrollada para estimar los errores promedio de muestreo a largo plazo. Se tomó el mismo período de análisis usado para los casos anteriores, es decir, abril-septiembre 1969-1974. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 11.-

Tabla 11. Errores de Estimación de la Precipitación media mensual por el método de HUFF.

NUMERO DE ESTACIONES	DENSIDAD MILLAS ² /EST.	ERROR MEDIO PULGADAS	ERROR MEDIO %
1	21484	2,86	23,22
2	10742	1,70	13,71
10	2148	0,50	4,03
20	1074	0,29	2,38
30	716	0,22	1,75
40	537	0,17	1,41
50	429	0,15	1,19
60	358	0,13	1,03
100	215	0,09	0,70

Aquí también se puede observar que el error de estimación decae en forma significativa con el incremento del número de estaciones hasta 30, indicando que no se justifica la instalación de un número mayor de ellas. Es necesario hacer notar que no se ha cumplido la condición básica del método en relación con el límite de densidad máxima de 400 mill²/EST.

5.- DISCUSION SOBRE LA APLICABILIDAD DE LOS METODOS.

Al describir las metodologías utilizadas, se ha visto que el criterio básico empleado por cada una está dado por el error de estimación del parámetro muestreado.

Los resultados que se han obtenido en referencia a la densidad mínima de la red pluviométricas en la cuenca, son concordantes para todos los métodos. La aplicabilidad de cada procedimiento está determinada por la disponibilidad de la información básica requerida y naturalmente por la calidad y cantidad de los datos -- observados. Limitaciones de cantidad y calidad, obligan a introducir simplificaciones que podrían alterar el concepto básico en que se fundamenta cada uno.

./...

El método de la WMO requiere del conocimiento preciso de la topografía, sin la cual no es posible establecer los rangos de densidad. KAGAN, EAGLESON y RODRIGUEZ ITURBE-MEJIA, basan sus procedimientos en la definición de la función de correlación espacial; la cual quedará mejor definida mientras mayor sea el período de observación disponible y más densa la red que se use para el análisis. HUFF utiliza un procedimiento de inferencia o extrapolación, basada en los principios de similitud zonal.

De acuerdo a la precisión de los parámetros de ajuste del método de KAGAN, éste se refleja como el de mayor aplicabilidad. Para demostrar este aspecto, se aplicó el procedimiento a la cuenca del Caroní, vecina a la del Caura, y se compararon los resultados con los obtenidos, para esa Cuenca, por EDELCA, utilizando los criterios de la WMO, y por COMPROSA, utilizando el método RIM. EDELCA recomienda la instalación de 58 nuevas estaciones pluviométricas; los resultados del método RIM convergen en 50 estaciones adicionales a las 9 usadas en el análisis; el método de KAGAN indica que un total de 50 estaciones sería suficiente. (Ver Anexo A).

Como se puede apreciar, los valores encontrados en los tres casos son similares, a pesar de que para la definición de la función de correlación espacial sólo se han usado 5 estaciones en la zona I y 4 en la zona II (COMPROSA, 1979).

Como una ampliación de la aplicabilidad del método de KAGAN, se usó en la cuenca del río Tuy, de características diferentes a las dos anteriores. Para tal efecto se empleó la información básica contenida en GUPTA y FOSSI (1976) encontrándose que sólo se requieren 35 estaciones. Actualmente son operadas alrededor de 51, lo cual indica un exceso de 16. Sin embargo es de hacer notar que el parámetro $\rho(0)$ fue muy bajo; $\rho(0) = 0,67$, a pesar del buen ajuste de la función. Esto indica un descenso brusco en la función $\rho(d)$ para el rango 0-20 Km. Estudios más detallados se requieren para el análisis de esta situación. (Ver anexo B).

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los resultados obtenidos mediante el uso de los métodos de diseño descritos en este trabajo, permite extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones principales.

- a) La red hidrometeorológica de la cuenca del río Caura, para poder suministrar la suficiente información básica requerida por los estudios de aprovechamientos hidráulicos debe estar constituida por lo menos de 30 estaciones pluviométricas, 14 hidrométricas y 8 evaporimétricas. La calidad de los datos dependerá fundamentalmente de la calidad de la instalación y de la operación.
- b) Todos los métodos han demostrado ser aplicables, sin embargo el que mejor se ajusta a las condiciones presentes de la cuenca es el de KAGAN, el cual también fu usado con éxito en la cuenca del Caroní.
- c) Se recomienda hacer conocer de este trabajo a las entidades involucradas en el uso de los recursos hídricos de la región, tal como CADAPE, EDELCA y el MINISTERIO DEL AMBIENTE.
- d) Se considera de gran importancia efectuar un análisis de la estructura de correlación espacial de la precipitación al nivel de la red meteorológica nacional, con el fin de extender la aplicabilidad del método o regionalizar sus parámetros.

FIGURA 2. FUNCION DE CORRELACION ESPACIAL PARA LA CUENCA DEL RIO CAURA

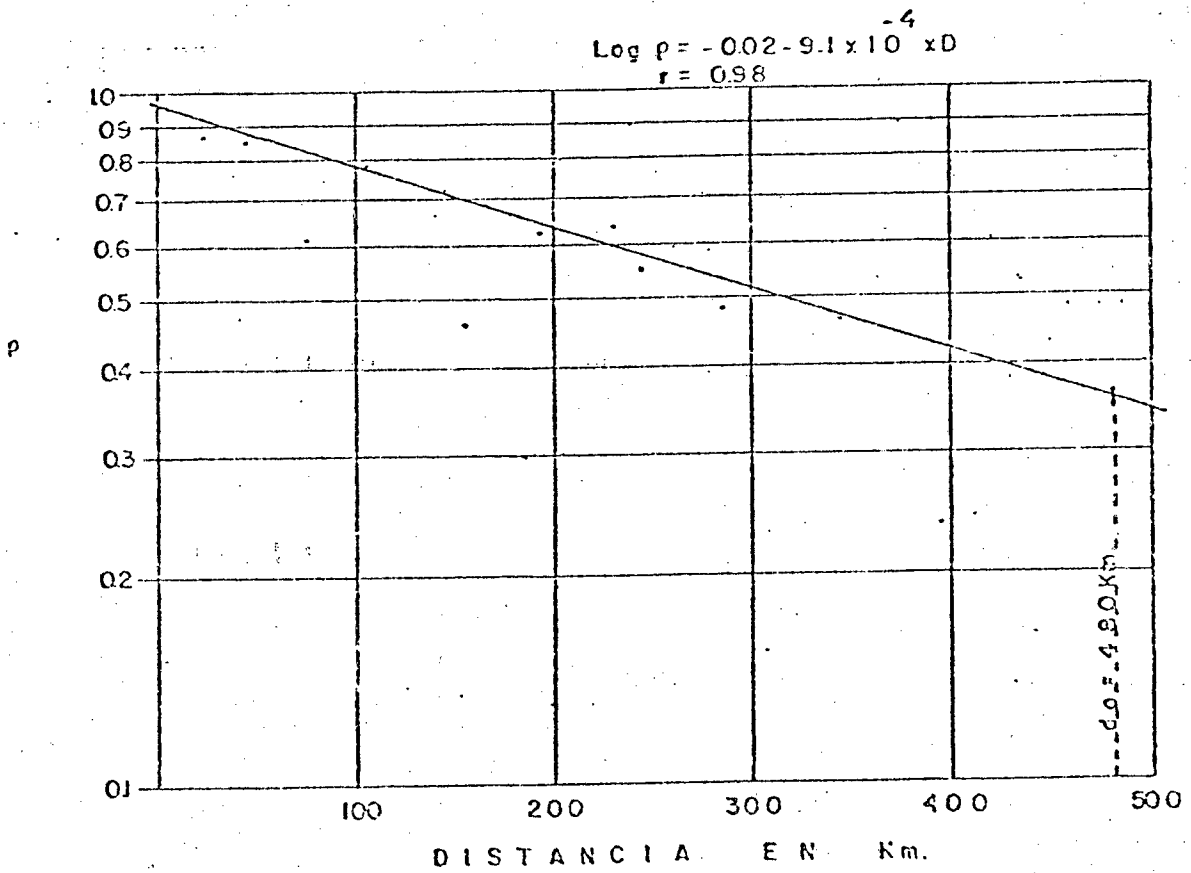


FIGURA 3

ERRORES RELATIVOS DE LA PRECIPITACION MEDIA (Z_1)
Y DE LA INTERPOLACION ESPACIAL (Z_3) EN FUNCION
DEL NUMERO DE ESTACIONES (n)

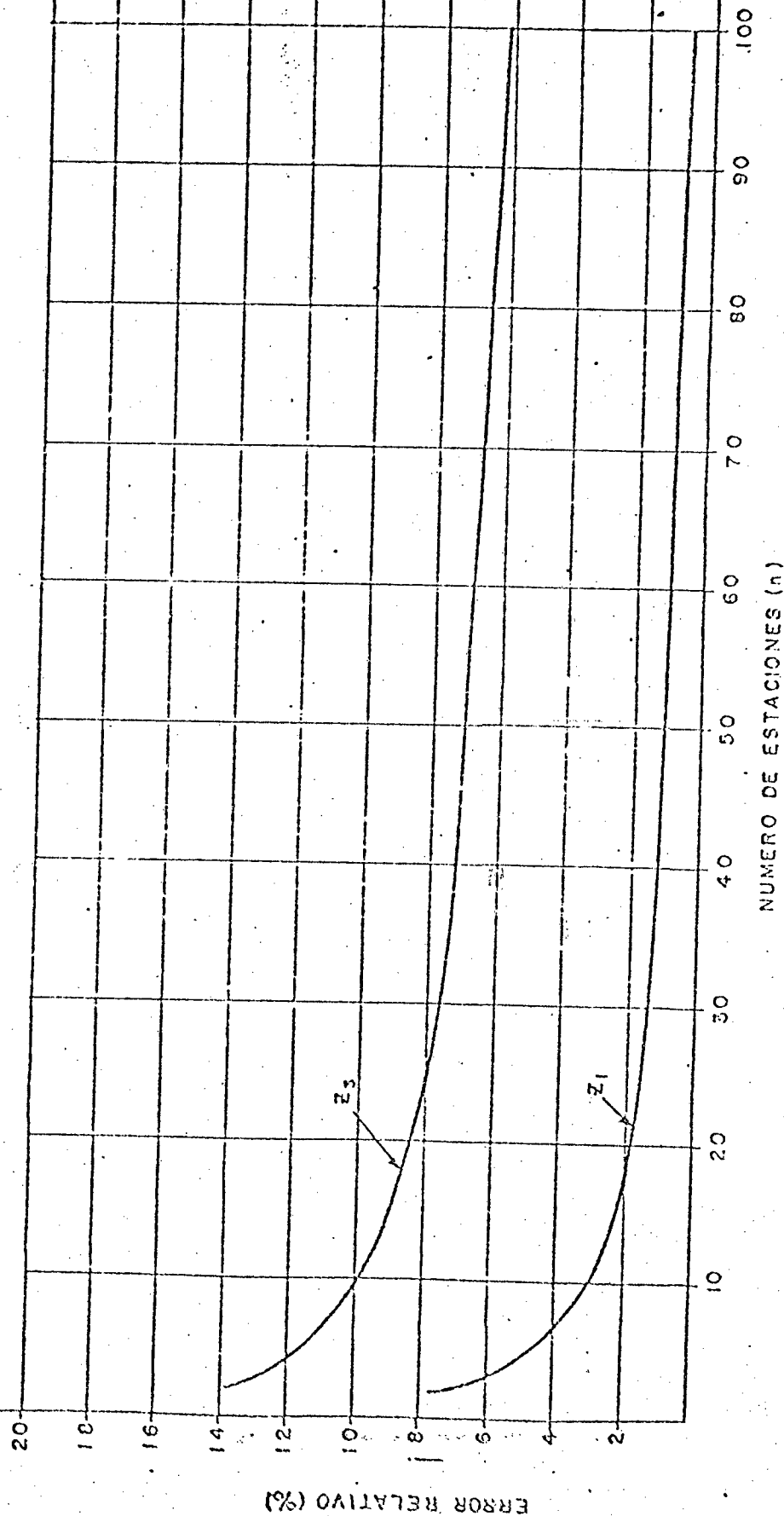
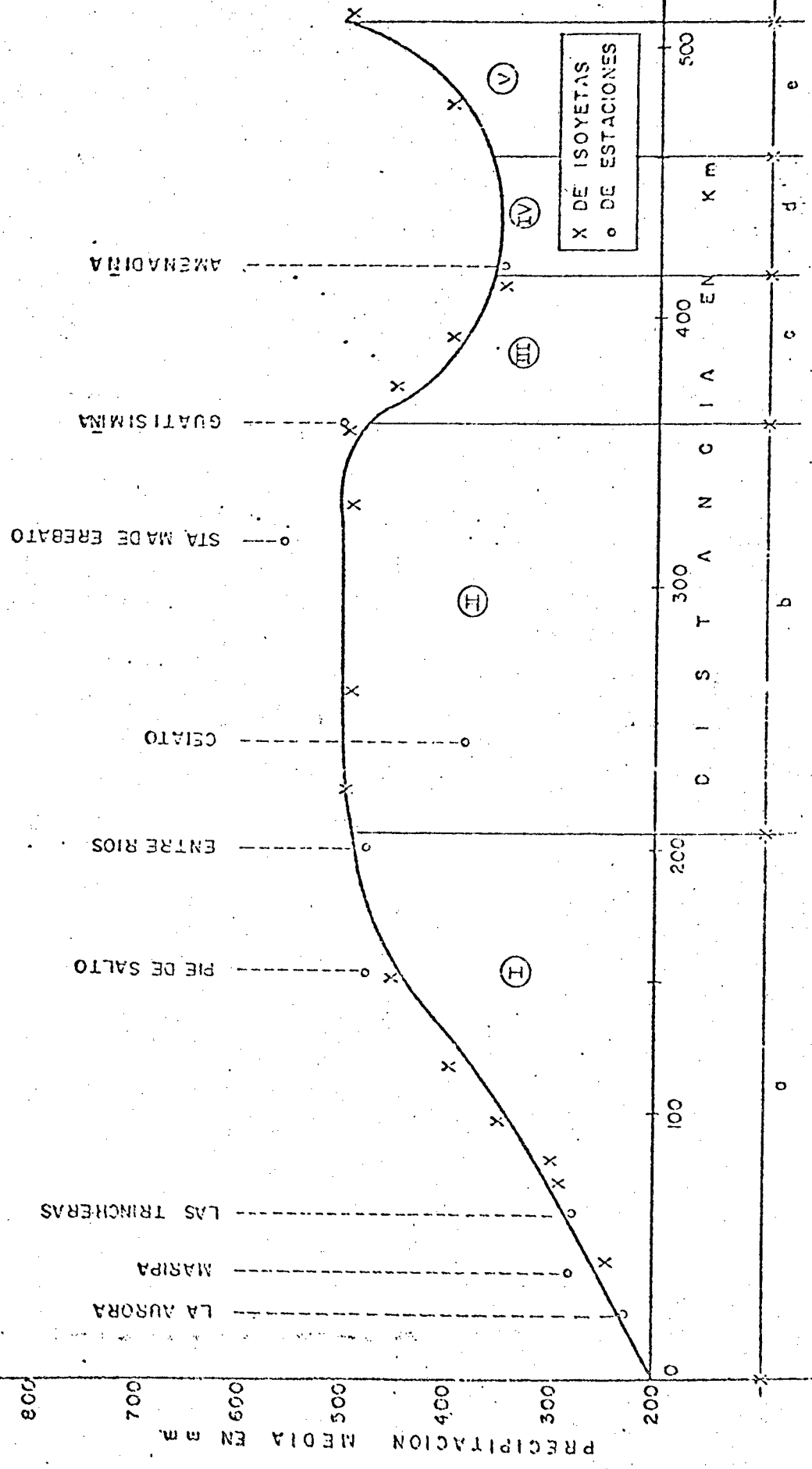


FIGURA 4 DISTRIBUCION DE ALTURAS DE PRECIPITACION PROMEDIO SOBRE LA CUENCA DEL RIO CAURA - JULIO 1969-1974



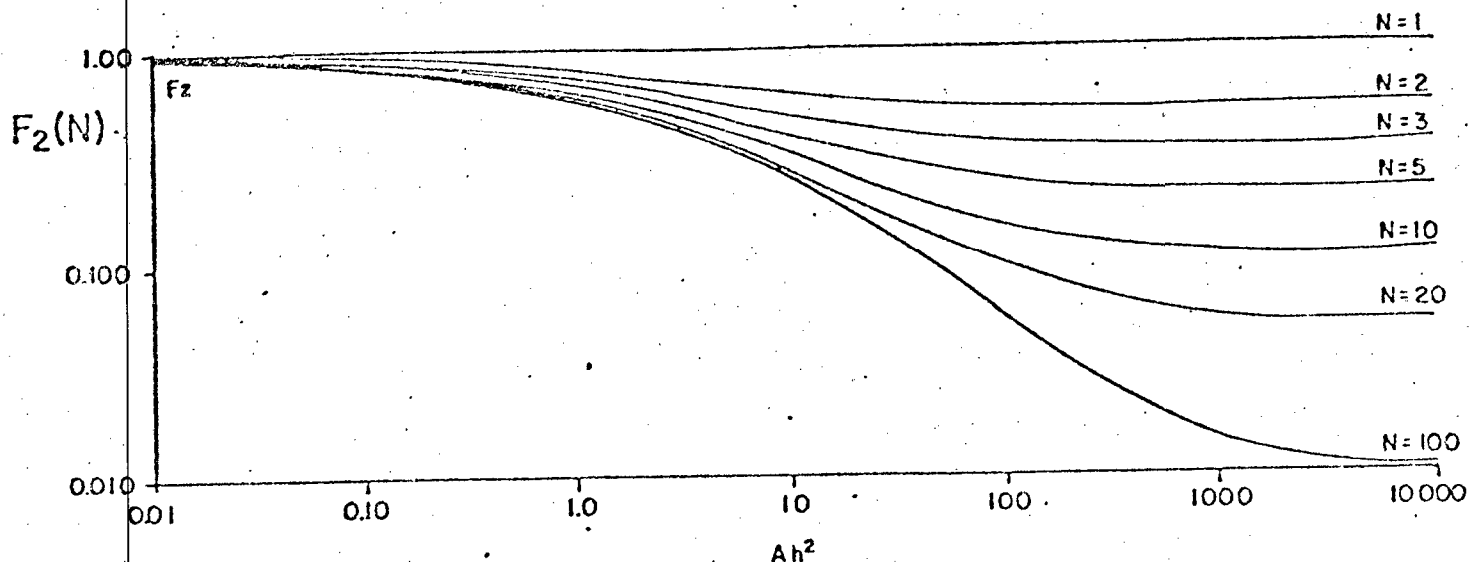


FIGURA 25

Factor de reducción de variancia debido a muestreo espacial con distribución aleatoria en la estimación de la precipitación media en el largo plazo. Tomado de Rodríguez Iturbe y Mejía (1974).

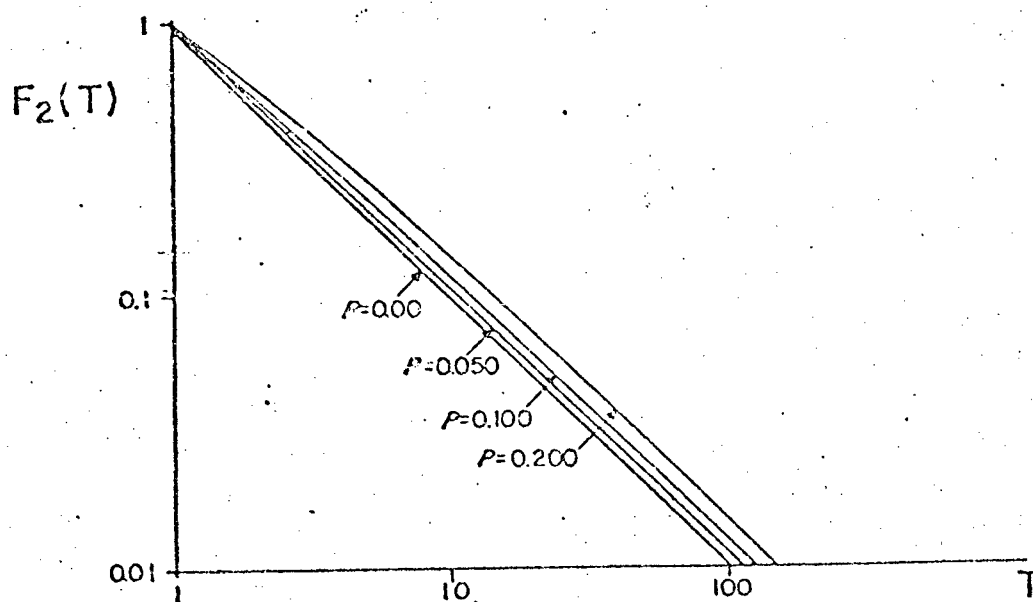


FIGURA 26

Factor de reducción de variancia debido a muestreo en el tiempo en la estimación de precipitación media en el largo plazo.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- BENSON M.A. (1967). "Average Probability of Extreme Events", W.R.R., 3,225.
- 2.- COPLANARNH (1978). "Plan Nacional de Instalaciones Hidrometeorológicas 1976-1985. "MOP". Caracas-Venezuela".
- 3.- CORONADO, F. (1974). "Un análisis para la determinación del espaciamiento entre pluviómetros". Segundo Seminario Nacional de Hidrología Lima-Perú".-
- 4.- COMPROSA (1979).- "Modelos de Predicción de Caudales. Río-Caroní-EDELCA, Caracas-Venezuela".
- 5.- EAGLESON P.S. and SHACK, W (1966) "Some criteria for the measurement of rainfall and runoff" WRR, - 2 (3), 427-436.
- 6.- EAGLESON, P.S. (1967) "Optimum Density of Rainfall Density" WRR. Nº 4, 1021-1033.
- 7.- EAGLESON P.S. (1969) "Temporal and Spatial Definition in Hydrology Modelling". MIT, Cambridge, Mass. USA. 1970.
- 8.- GANDIN, L.S. (1970) "On the planning of meteorological Station - Networks" WMO. Geneva, Tech Note Nº 111
- 9.- GUEVARA, E. (1980) "Hydrometeorological Assessment Report Jimma Región". GITEC CONSULT GMBH, Duesseldorf.
10. GHOSH, B. (1951) "Random distances within a rectangle and -- between two rectangles". Bull. Calcuta Math. Soc. 43,17-24.
11. GUPTA, L.V. y FOSSI, D (1976). "Diseño de redes hidrometeorológicas en cuenca del río Tuy". CIDIAT. Mérida- Venezuela.-

- 12.- HERSHFIELD, D.H. (1965). "On the spacing of raingauges". Sympo - -
sium Desing of Hydrological Neteorks, - -
Quebec IAHS, Pub. Nº 67 pp 72-79.
- 13.- HUFF, F.A. (1970). "Sampling errors in measurement of mean -
precipitation". Journ. of Appl Meteor,- -
Vol. 9, Nº 1."
- 14.- KAGAN, R.L. (1966) "An evaluation of the representantiveness
of precipitation data". Works of the ---
main Geophysical Observatory, Vol.191.URSS.
15. LANGBEIN, W.B. (1954) "Stream-Gauging network". IAHS, Pub. Nº 38
GENTBRUGGE.
16. LANGBEIN, W.B. (1960) "Hydrologic data networks and methods of-
extrapolaiting or extending available Hy-
drologic data". Trans.Int.Seminar on --
Hydrologic Networks and Methods UN-ECAFE-
WMO, BANGKOK.
17. LANGBEIN, W.B.(1965) "National Networks of Hydrological data".
IAHS Pub. Nº 67, Gentbrugge.
18. MATERN, B. (1960). "Spatial variati6n", Medd St. SK. Swed, -
49 (5).
19. MARTIN, D. y SCHERER W. (1973). "Review of Satelite rainfall Esti-
mation Methods". Bul. of Am. Met. Soc. Vol.
54 Nº 7, 661-674.
20. MUÑOZ, C.A. (1975) "Review and Assessment of the Hydrometeo-
rologica Knowledge of Water Resources in-
Ethiopia". Vol 1,2; Ewra, Addis Ababa- -
Ethiopia.
- 21.-OCOIDES A-CADAFE (1979) "Actualización del Estudio Hidrol6gico de
la cuenca del rfo Caura. Borrador.

- 22.- RODDA, J.C. et al, (1969) "Hydrologic Network Design-Needs, Problems and Approches". WMO. Rep. 12 Geneva.
- 23.- SABATINI. R.R. (1975) "Errores de precipitación Zonal en Venezuela" E.S.C. Washington-Coplanarnh.MOP.
24. SCHWARZ. R.J. and B. FRIEDLAND (1965). "Linear Systems". Mac Graw Hill Book Co. Inc. N.Y.
25. SHAW, E.M. and O'CONNELL, P.E. (1975). "Design of networks and data transfer for precipitación". Dpto. of Civil Eng. Imperial College, London.
- 26.- WATT, W.E. and WILSON, - K.C. (1973). "An economic approach for evaluating -- the adequacy of hydrologic data". WRP.- Proc. of the second International Symposium in Hydrology.
- 27.- WILSON, K.C. (1972) "Benefit-Accuracy Relationship for Small Structure Design Floods". WRR, 8, 508-512.
28. WMO (1972). "Case book on hydrological Network Design Practice Nº 324 Geneva."
- 29.- WMO (1967) "Guide to Hydrometeorological Practices- WMO Nº 168. T.P. 82 Geneva".
30. UNITED NATIONS (1968) "The use and interprelation of Hydrologic data" Proc. of nine Seminar Water Resources Series Nº 34.

A N E X O S

A.- APLICACION DEL METODO DE KAGAN A LA CUENCA DEL RIO CARONI

B.- APLICACION DEL METODO DE KAGAN A LA CUENCA DEL RIO TUY. -

A.- APLICACION DEL METODO DE KAGAN A LA CUENCA DEL CARONI

1.- CALCULO DE LA FUNCION DE CORRELACION ESPACIAL.

Se adoptó la función exponencial $(d) = e^{-hd}$ y se usó la información suministrada por COMPROSA (1979) sobre espaciamiento y correlación cruzada. Igualmente se consideraron las dos zonas establecidas por COMPROSA como de homogeneidad definida: La primera entre los paralelos 6° N y $7^{\circ} 30'$ N y los meridianos $61^{\circ} 0'$ y $64^{\circ} 0'$, incluye las estaciones San Pedro de las Bocas, Arekuna, La Paragua, Tumeremo y El Manteco. La segunda zona está comprendida entre los paralelos 4° N y 6° N y entre los mismos meridianos que la zona anterior; y comprende las estaciones Kavanayén, Wonken, Santa Elena de Uairen y Camarata. Para evaluar el parámetro h de la función de correlación exponencial, se utilizó el procedimiento de la distancia característica de correlación, descrita en el método RIM (cap. 3.5). Debido a la sensibilidad de dicho parámetro, se creyó conveniente calcular nuevamente la función en vez de usar directamente la establecida por COMPROSA (1979). Los resultados obtenidos son como se indican a continuación:

a) ZONA I

- Ubicación: $6^{\circ} - 7^{\circ} 30' N$
 $61^{\circ} - 64^{\circ} 0'$
- Precipitación media anual $\bar{P} = 1568$ mm
- Desviación estandar de \bar{P} $\sigma = 528$ mm
- Coeficiente de variación $CV = 0,34$ mm
- Area $A = 55554$ Km²
- Factor de forma $\alpha = 2$
- Distancia al azar $\delta = 0,5691$ Km
- Diagonal equivalente $d = 372.6$ Km
- Diagonal unitaria $du = 1.58$ Km

- Distancia característica $D = 134 \text{ Km}$
- Correlación a la distancia $D, \rho = 0.28$
- Parámetro $h = 0,0095$
- Función de correlación: $\rho(d) = e^{-0.0095 d}$

b) ZONA II

- Ubicación: 6° a $7^{\circ} 30'$ N
 61° a 64° O

- Parámetros como se definen para la Zona I:

$$\begin{array}{lll} \bar{P} = 2413 \text{ mm} & d = 1.5 & D = 159 \text{ Km} \\ \sigma = 714 \text{ mm} & \delta = 0,5453 & \rho = 0,10 \\ C_v = 0,30 & d = 430 \text{ Km} & h = 0,01333 \\ A = 74072 \text{ Km}^2 & du = 1,472 \text{ Km} & \rho(d) = e^{-0,01333 d} \end{array}$$

2. RESULTADOS

Con los datos básicos dados anteriormente, se establecieron las relaciones para el error relativo, Z_1 , y error de interpolación Z_3 , en ambas zonas:

$$\text{Zona I: } Z_1 = 0,34 \left[\frac{0,49\sqrt{n}}{n} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad Z_3 = 0,34 \left[\frac{1,11}{\sqrt{n}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Zona II: } Z_1 = 0,30 \left[\frac{0,99\sqrt{n}}{n} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad Z_3 = 0,30 \left[\frac{2,25}{\sqrt{n}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Los resultados obtenidos para Z_1 , Z_3 en función del número de estaciones ,n, se presentan a continuación en la Tabla 1:

TABLA 1. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA CUENCA DEL CARONI POR EL METODO DE KAGAN.-

Nº de Estaciones	Zona I		Zona II	
	Z1	Z3	Z1	Z3
2	14.0	35,8	17.8	37.8
5	7,0	24,0	8.9	30.1
10	4,0	20,0	5.3	25.3
20	3,0	16,9	3.2	21.3
30	2,0	15,3	2.3	19.2
40	1.5	14.2	1.9	17.9
50	1.3	13.5	1.6	16.9
60	1.1	13.0	1.4	16.2
70	1.0	12.4	1.2	15.6
80	0.9	12.0	1.1	15.1
90	0.8	11.6	1.02	14.6
100	0.8	11.3	0.94	14.2

3.- RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS DE EDELCA Y COMPROSA

Con el fin de poder comparar el método de KAGAN con los procedimientos usados por EDELCA y COMPROSA, se transcriben a continuación los resultados de estos dos últimos (Tomados de COMPROSA, 1979), en el siguiente orden:

- Tabla 2.- Número de estaciones requeridas por sub-cuencas (EDELCA)
- Tabla 3.- Disminución en porcentaje de la varianza de la estimación promedio a largo plazo para toda la zona I.
- Tabla 4.- Disminución en % de la varianza de la estimación del promedio a largo plazo para toda la zona II.

4.- COMPARACION DE LOS METODOS.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, EDELCA recomienda la instalación de 58 nuevas estaciones pluviométricas. Los resultados de COMPROSA (Tablas 3 y 4) convegen en unas 50 estaciones adicionales (20 en la Zona I y 30 en la Zona II) a las 9 usadas en el análisis, considerando un período de observación de 20 - años. El método de KAGAN indica que sería suficiente la instalación de 50 estaciones, 20 en la Zona I y 30 en la Zona II. - La diferencia de los resultados entre estos dos últimos procedimientos no es significativa.

TABLA 2

Número de Estaciones requeridas por Subcuenca (EDELCA)

	1	2	3	4	5	6
SUB CUENCA	Número de Estaciones Existentes	Número de Estaciones (Densidad Min)	Diferencia (EST) (3)=(2)-(1)	Número de Estaciones bajo Densidad tolerable	Diferencia (5)=(4)-(1)	Número de Estaciones Requeridas
RIO PARAGUA	10	a) 363 b) 145	a) 353 b) 135	a) 145 b) 36	a) 135 b) 26	26
ALTO CARONI	10	a) 421 b) 168	a) 411 b) 158	a) 168 b) 42	a) 158 b) 32	32
BAJO CARONI	6	a) 25 b) 17	a) 19 b) 11	a) 17 b) 5	a) 11 b) 0	0
TOTALES	26	a) 809 b) 330	a) 783 b) 304	a) 330 b) 83	a) 304 b) 58	58

TABLA 3

DISMINUCION EN % DE LA VARIANZA DE LA ESTIMACION
DEL PROMEDIO A LARGO PLAZO PARA TODA LA ZONA 1-

NUMERO DE ESTACIONES ADICIONALES:	NUMERO DE AÑOS DE REGISTROS ADICIONALES:			
	0	10	20	100
0	0	43,2	61,3	90,2
5	15,7	51,0	66,7	90,3
15	21,6	54,9	70,6	90,0
95	25,5	56,9	71,0	92,0

NOTA: Basado en 5 estaciones con 11 años de registro
(1965-1975)

Estaciones: (San Pedro, Arekuna, La Paragua, Tumeremo
y El Manteco).

TABLA 4

DISMINUCION EN % DE LA VARIANZA DE LA ESTIMACION
DEL PROMEDIO A LARGO PLAZO PARA TODA LA ZONA 2

NUMERO DE ESTACIONES ADICIONALES:	NUMERO DE AÑOS DE REGISTROS ADICIONALES:			
	0	10	20	100
0	0	41,9	60,5	88,4
5	13,9	51,2	67,4	90,7
10	23,3	55,9	69,8	90,7
95	27,9	58,1	72,1	90,7

NOTA: Basado en 4 estaciones con 11 años de registro (1965-1975)

Estaciones: (Kavanayén, Wonken, Sta. Elena y Camarata).---

B.- APLICACION DEL METODO DE KAGAN A LA CUENCA DEL RIO TUY

1. FUNCION DE CORRELACION ESPACIAL

Se utilizó como información básica los datos contenidos en GUPTA y FOSSI (1976), considerándose también la división de la cuenca en 2 zonas desde el punto de vista de momogeneidad hidrológica.

Zona I: Parte de la cuenca ubicada por debajo de 400 m.s.n.m.

Zona II: Parte de la cuenca con altitudes mayores que 400 m.s.n.m.

El análisis de los datos dió como resultados la siguiente información básica de la función de correlación espacial (Tabla 5).

Tabla 5. Datos básicos de la función de correlación espacial

Rango	Nº casos	\bar{d}	$\bar{\rho}$	Nº casos	\bar{d}	$\bar{\rho}$
0-20	91	12.8	0.63	19	13.1	0.60
20-40	129	29.2	0.50	44	29.6	0.45
40-60	79	49.5	0.43	55	49.8	0.42
60-80	68	70.5	0.37	34	70.1	0.35
80-100	65	89.5	0.33	17	88.8	0.26
100	23	106.5	0.28	2	103,3	0.22

Con los datos de la Tabla 5 se estableció por los mínimos cuadrados la función de correlación espacial para cada zona, la misma que tiene la siguiente expresión:

$$\text{Zona I: } \rho(d) = 0,662 e^{-d|124}$$

$$r = 0,992$$

$$\text{Zona II: } \rho(d) = 0,674 e^{-d|95}$$

$$r = 0,985$$

Para aplicar el método se seleccionó el mes de julio, por ser éste el de mayor precipitación. A continuación se presentan los datos básicos:

<u>Parametro</u>	<u>Zona I</u>	<u>Zona II</u>
Area en Km ²	3304	3304
Precipitación media en mm	200.1	189.5
Desviación estandar	70.03	73.5
Coeficiente de variación	0.35	0.39
Número de estaciones actual	31	20

2. RESULTADOS

Con los datos dados anteriormente se establecieron las funciones para Z1 (error de muestreo relativo) y Z3 (error de interpolación espacial):

$$\text{Zona I: } Z1 = 0,35 \left[\frac{0,338 + 0,107/\sqrt{n}}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Z3 = 0,35 \left[0,113 + 0,16\sqrt{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Zona II: } Z1 = 0,39 \left[\frac{0,33 + 0,14/\sqrt{n}}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Z3 = 0,39 \left[0,17 + 0,21\sqrt{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. - Resultados del método de KAGAN en la cuenca del río Tuy.

Nº de Es taciones	Zona I		Zona II	
	Z1	Z3	Z1	Z3
2	15.9	16.6	18.1	22,0
5	9.7	15.0	10.9	20.0
10	6.7	14.2	7.5	19.0
20	4.7	13.5	5.2	18.2
30	3.8	13.2	4.2	17.8
40	3.3	13.0	3.7	17.6
50	2.9	12.9	3.3	17.4
60	2.7	12.8	3.0	17.3

Los resultados de la Tabla 6 indican que no es recomendable operar más de 15 estaciones en la Zona I y 20 en la Zona II. Esto indica que se podrían discontinuar unas 16 de las 51 que actualmente se encuentran en operación. Sin embargo, hay que hacer notar que $\rho(0)$ con un valor aproximado de 0.67 es muy bajo para reflejar la verdadera estructura de la función de correlación espacial. Se requieren de análisis más detallados para estudiar este fenómeno.

