

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO**  
**OFICINA DE INVESTIGACIONES**  
**DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS Y COMPUTACIÓN**

**Diseño de una red para el monitoreo  
de la calidad del agua del Río Quindío  
en el tramo correspondiente a la Cuenca Alta**

**Investigadores principales**

**. Luis Hernando Hurtado Tobón**  
**. María Dolly García González**  
**. Gladys Elena Salcedo Echeverry**

**Armenia, septiembre 14 del 2000**

## O. RESUMEN DEL PROYECTO

### TITULO :

Diseño de una red para el monitoreo de la calidad del agua del Río Quindío en el tramo correspondiente a la cuenca alta.

### INVESTIGADORES PRINCIPALES:

- Luis Hernando Hurtado T.
- María Dolly García G.
- Gladys Elena Salcedo E.

**TIEMPO DE EJECUCION:** 10 meses

**COSTO TOTAL:** \$47'600.000

### ENTIDADES FINANCIADORAS:

- |                           |              |
|---------------------------|--------------|
| ■ Universidad del Quindío | \$28'200.000 |
| ■ Entidad por definir     | \$19'400.000 |

**ENTIDAD EJECUTORA:** Universidad del Quindío

**TABLA DE CONTENIDO**

	Página.
0. RESUMEN DEL PROYECTO	
1. PLANTEAMIENTO EL PROBLEMA	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. JUSTIFICACION	4
4. MARCO TEORICO	5
4.1 La Contaminación de los Cuerpos Hídricos	5
4.2 Sobre la Técnica del Kriging	6
4.3 La Red de Monitoreo	9
5. METODOLOGIA	10
5.1 Población y Muestra	10
5.2 Técnicas de Análisis de la Información	11
5.3 Las Actividades	12
5.4 Cronograma de Actividades	14
6. RESULTADOS ESPERADOS	15
7. RECURSOS	16
7.1 Humanos	16
7.2 Técnicos	17
7.3 Financieros	19
BIBLIOGRAFIA	

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Río Quindío es la principal fuente de agua para consumo humano en la región del Quindío, como quiera que surte los acueductos de Circasia, Salento y Armenia donde se alberga más del 60% de la población actual del Departamento. Este Río es el cauce principal de la cuenca y atraviesa la llamada Cuenca Alta en una longitud de 24182 m. que corresponde al recorrido desde su nacimiento hasta el punto donde el agua empieza a ser utilizada para abastecer el acueducto de Armenia, sitio conocido como la Bocatoma.



En su recorrido por la Cuenca Alta, el Río atraviesa una zona agrícola y ganadera con una significativa presencia de asentamientos humanos, todo ello constituyéndose en factores de contaminación permanente del mismo Río. Si a esto se agrega la presencia temporal pero creciente de visitantes en la ribera del Río, últimamente como consecuencia del auge del turismo en la región de Cócora, es de esperar en el corto tiempo un aumento en los niveles de contaminación.

Los tipos de contaminación y los niveles que se presentan actualmente en el agua del Río Quindío hacen que resulte eficaz para su control el manejo que se hace tradicionalmente en las plantas de tratamiento de los acueductos y que se fundamenta en métodos físicos y químicos, que consisten en producir circulación y caídas de agua para liberar algunas sustancias químicas por combinación con el oxígeno del aire y en la agregación de químicos para precipitar sólidos suspendidos y eliminar algunas bacterias.

Este método tradicional de tratamiento de agua que hasta ahora resulta eficaz, puede ser además eficiente en términos de abaratamiento de costos y minimización de riesgos para la salud, si se combina con un sistema de vigilancia permanente que permita intervenir la Cuenca Alta para controlar las fuentes de contaminación antes que afecten las aguas.

El sistema de vigilancia permanente se fundamenta en la ubicación inicial de los focos de contaminación del Río y el diseño de una Red Óptima de Monitoreo para hacer un seguimiento de la evolución de estos focos, como respuesta a las acciones

correctivas que se tomen. La Red de Monitoreo permitirá además detectar la aparición de nuevos focos de contaminación en el momento en que se presenten.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de vigilancia permanente que permita controlar la contaminación del Río Quindío en la parte que corresponde a la Cuenca Alta.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- 2.2.1 Ubicar los sitios de contaminación actuales y sus características, en la parte del Río que está en estudio.
- 2.2.2 Diseñar una Red Óptima de Monitoreo que permita hacer un seguimiento permanente del comportamiento espacial de los contaminantes del Río.
- 2.2.3 Evaluar el posible impacto del turismo sobre los niveles de contaminación del Río en la temporada alta.

## **3. JUSTIFICACION**

La ubicación de los focos de contaminación permitirá a las entidades encargadas de la protección del recurso hídrico, optimizar las inversiones en obras de infraestructura y en otros proyectos que apunten a mejorar la calidad del agua. Así mismo

desarrollar con la comunidad de la zona aledaña al Río, programas educativos y de concientización sobre el manejo de desechos y otros elementos contaminantes.

Este tipo de intervención sobre la cuenca alta del Río Quindío deberá reflejarse en una disminución de los niveles de contaminación en el agua que ingresa a las plantas de tratamiento de los acueductos y como consecuencia en menores requerimientos de sustancias químicas, lo cual implicará reducción de costos y disminución de riesgos para la salud de la población que consume agua de estos acueductos.

La Red de Monitoreo permite además un seguimiento permanente a los tipos y niveles de contaminación que se presentan en el Río, así como la ubicación de sitios críticos, facilitando acciones eficaces apoyadas en una información oportuna.

Aprovechando la infraestructura que ofrece la Red de Monitoreo se podrán hacer estudios sobre el impacto que tiene en la contaminación del Río el flujo de turistas al Valle de Cócora en temporada alta, y el impacto de diferentes intervenciones institucionales de saneamiento ambiental con énfasis en el recurso hídrico.

#### **4. MARCO TEORICO**

##### **4.1 La Contaminación de los Cuerpos Hídricos**

Las fuentes de contaminación de los cuerpos hídricos son básicamente de dos tipos, naturales y antrópicos. Entre las fuentes naturales se pueden mencionar las fuertes lluvias sobre zonas escarpadas que conllevan el arrastre de material sólido a los cuerpos de agua, lo cual ocurre con mayor intensidad en suelos desprotegidos

de vegetación. Los materiales arrastrados por las lluvias son de carácter biótico, de tipo bioquímico y microbiológico y de carácter abiótico como partículas del suelo y minerales.

Los factores de tipo antrópico tienen que ver con los sistemas productivos intensivos y las aguas residuales de los diferentes poblados, aguas negras y grises que terminan siendo vertidas a los cuerpos de agua. Para el caso del Río Quindío se han identificado como factores causantes de contaminación de tipo antrópico los siguientes:

1. Los sistemas productivos ganaderos en la Cuenca Alta que favorecen la remoción y transporte de partículas del suelo a las fuentes de agua, debido al pisoteo del ganado en zonas de pendiente pronunciada. También el manejo de ganadería estabulada que concentra en pequeñas áreas, grandes cantidades de estiércol los cuales luego son lavados y vertidos a los cauces de agua.
2. La truchera que vierte excrementos y residuos de peces en un solo sitio del Río.
3. El asentamiento humano en la zona de Boquía que vierte sus aguas residuales, sin tratamiento, al Río Quindío.
4. Las basuras, residuos orgánicos y otros que dejan los turistas en las riberas del Río.
5. Los residuos de herbicidas y fungicidas utilizados en la agricultura, los cuales se incorporan por arrastre a los pequeños arroyos y finalmente al Río.

#### **4.2 Sobre la Técnica del Kriging**

El Kriging es una técnica de interpolación espacial que se apoya en la autocorrelación que existe en la variable a interpolar considerada en diferentes puntos de una región; es decir en el hecho de que la variable en un punto esté asociada consigo misma en otro punto en una intensidad que depende de la ubicación y la distancia que separa los dos puntos. Esta técnica fue desarrollada inicialmente por D.G. Krige, 1951, quien además hizo una aplicación intensiva de ella en la evaluación de recursos mineros (principalmente oro) en una zona del Africa.

La posibilidad de aplicar Kriging en problemas biológicos es muy clara, toda vez que los fenómenos biológicos están ligados por naturaleza al tiempo y al espacio y por lo tanto es posible que las variables que los describen temporal o espacialmente resulten autocorrelacionadas.

La técnica del Kriging se puede describir en forma muy esquemática de la siguiente manera:

Supóngase que en una región **R** se localizan  $n$  puntos de los cuales se registran sus coordenadas y se toman valores de una variable  $Y$  en cada una de estas localizaciones.

Dadas las coordenadas de un nuevo sitio de **R** se trata de estimar o predecir el valor que debe tomar  $Y$  en ese nuevo sitio.

La variable  $Y$  en el  $i$ -ésimo punto  $i = 1, 2, \dots, n$  se representará por  $Y_i$  y en el nuevo sitio por  $Y_0$ . La idea del Kriging es predecir  $Y_0$  a través de una combinación lineal de los  $Y_i$  esto es

$$\hat{Y}_0 = \sum_{i=1}^n a_i Y_i$$

y el problema se reduce a encontrar los  $a_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  tales que el error cuadrado medio de predicción sea mínimo bajo la condición además de que  $\hat{Y}_0$  sea un estimador insesgado de  $Y_0$ .

El error cuadrado medio de predicción (ECM) está dado por

$$\text{ECM} = E[(Y_0 - \hat{Y}_0)^2].$$

Utilizando el método de multiplicadores de Lagrange para minimizar ECM, con la condición de insesgamiento para  $\hat{Y}_0$  se llega a que el vector

$$\mathbf{a}' = (a_1, a_2, \dots, a_n, \lambda)$$

se obtiene a través de  $\mathbf{a} = C^{-1} \mathbf{h}$  con

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} & 1 \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} & 1 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} c_{10} \\ c_{20} \\ \vdots \\ c_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

donde  $c_{ij}$  representa la covarianza entre las variables  $Y_i$  y  $Y_j$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, n$  y  $\lambda$  el multiplicador de Lagrange.

El valor del Error Cuadrado Medio de predicción, en términos de los  $c_{ij}$  y de  $\lambda$  puede finalmente expresarse como

$$E[(Y_0 - \hat{Y}_0)^2] = c_{00} - \sum_{i=1}^n a_i c_{i0} - \lambda \quad \text{Warrin (1987)}$$

### 4.3 La Red de Monitoreo

La Red de Monitoreo es un conjunto de puntos de información permanente, localizados en forma estratégica a lo largo del Río en una zona de estudio, su ubicación es tal que siendo un número menor de puntos producen suficiente información sobre todo el sistema.

La construcción de la Red de Monitoreo parte del supuesto de que existe un conjunto  $\mathbf{S}_0$  de  $n$  puntos que reúne la mayor información sobre el sistema en estudio y que puede ser identificado a partir del conocimiento biológico que se tiene del mismo. La Red de Monitoreo es un subconjunto de  $\mathbf{S}_0$ , llamado  $\mathbf{S}_1$ , que tiene solamente  $m$  puntos ( $m < n$ ) y que contiene aproximadamente la misma información que  $\mathbf{S}_0$ .

La construcción del subconjunto  $\mathbf{S}_1$  puede hacerse a través de un proceso de eliminación de elementos de  $\mathbf{S}_0$  paso a paso, eliminando en cada paso aquel punto de  $\mathbf{S}_0$  que produce el menor incremento en el valor del Cuadrado Medio del Error de Predicción (varianza del predictor del Kriging).

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. Población y Muestra.

El objeto de estudio es la contaminación del Río Quindío en el tramo comprendido entre el nacimiento a 3600 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la llamada Bocatoma a 1800 msnm.

En este caso la contaminación del Río Quindío se describe por el comportamiento de las siguientes variables (o parámetros bioquímicos) :

- Oxígeno disuelto
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Concentración de fósforo
- Concentración de nitrógeno
- Sólidos suspendidos
- Coliformes totales

Se supone que el estado de contaminación del Río puede determinarse a partir de información sobre las variables mencionadas, en un conjunto finito de  $n$  sitios que inicialmente se pueden localizar a partir del conocimiento que los especialistas tienen sobre el Río y los factores contaminantes; es decir una muestra inicial  $S_0$  escogida a criterio. Para controlar el posible efecto del factor temporada la muestra  $S_0$  se toma dos veces durante el estudio, en la época de lluvia y en temporada seca.

## 5.2 Técnicas de análisis de la información

La información de campo (muestras de agua) es sometida a un análisis químico y bacteriológico para evaluar en ellos los valores que toman las variables en estudio. Agregando a estos datos las coordenadas de los sitios de muestreo, se construye una matriz de datos sobre la cual se aplica la técnica del Kriging (Cressie, 1993) para hacer una predicción de los valores de cada una de las variables en toda la zona de estudio. Estas predicciones se resumen en mapas de distribución espacial de cada una de las variables y en los mapas se pueden localizar las zonas del Río donde las variables toman valores críticos o sea los focos de contaminación.

La construcción de la Red de Monitoreo se apoya justamente en el hecho de que el ECM o varianza del predictor del Kriging, no depende del valor de la variable en el punto donde se hace la predicción, sino que depende totalmente de la estructura de autocorrelación (valores de los  $a_i$ ,  $c_{ij}$  y  $\lambda$ ). Así que se puede partir de una red inicial y con el conocimiento que se obtiene de la estructura de autocorrelación a partir de la muestra  $\mathbf{S}_0$ , se van eliminando de esta red inicial puntos en tal forma que el incremento en el valor del ECM sea mínimo.

Se trata entonces de un procedimiento computacional iterativo que parte de una red inicial  $\mathbf{S}_0$  formada por un conjunto de puntos elegidos a criterio de especialistas y a partir de la cual se van eliminando, paso a paso, aquellos puntos de  $\mathbf{S}_0$  que hacen mínimo el incremento en el valor del ECM, para formar una nueva red  $\mathbf{S}_m$  de  $m$  puntos que corresponde a la Red de Monitoreo.

El tamaño  $m$  de la red puede ser un valor de entrada o un resultado del proceso; en el segundo caso correspondería al número de puntos que se tienen en la  $i$ -ésima

etapa cuando en la etapa  $i + 1$  se identifica un punto aislado, esto es, un punto tal que todas las distancias entre él y los demás puntos sean mayores que el horizonte de autocorrelación.

Para cuantificar el efecto de la presencia masiva de turistas en la región de Cocora en la época de alta temporada, se toma información días antes y después de la presencia de turistas y se comparan los mapas de Kriging construidos a partir de la red de monitoreo, con el propósito de identificar focos y tipos de contaminación.

### **Las Actividades**

El siguiente es el conjunto de actividades con sus tiempos estimados en quincenas, que se deben desarrollar en la ejecución del proyecto.

A<sub>1</sub> : revisión de bibliografía y construcción de programas de computador  
(20 quincenas).

A<sub>2</sub> : ubicación de los puntos de la red inicial,  $S_0$ , con coordenadas georeferenciadas y toma de las muestras de agua para la temporada seca (2 quincenas) y levantamiento planimétrico de la zona de estudio

A<sub>3</sub>: procesamiento químico y biológico de las muestras de agua (1 quincena)

A<sub>4</sub> : procesamiento estadístico de la información para obtener los mapas de distribución espacial de cada una de las variables en la temporada seca (2 quincenas).

A<sub>5</sub>: procesamiento de datos para construir la Red de Monitoreo que mejor responde en la temporada seca (2 quincenas).

A<sub>6</sub>: toma de muestras de agua en la temporada lluviosa (2 quincenas).

A<sub>7</sub>: procesamiento químico y biológico de las muestras de agua para la temporada lluviosa (1 quincena).

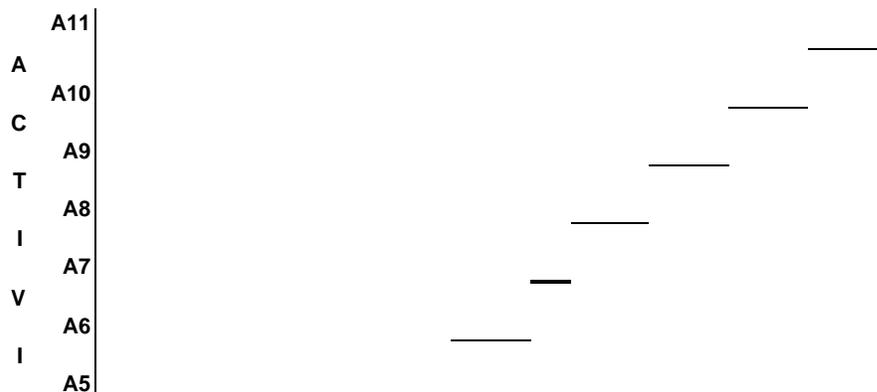
A<sub>8</sub>: procesamiento estadístico de la información para obtener los mapas de distribución espacial de cada una de las variables en la temporada lluviosa (2 quincenas).

A<sub>9</sub>: construcción de la Red de Monitoreo con los datos de la temporada lluviosa para realizar posibles ajustes a la Red obtenida en la otra temporada (2 quincenas).

A<sub>10</sub>: estudio del impacto que tiene en la contaminación del Río, el flujo de turistas en temporada alta (2 quincenas).

A<sub>11</sub>: elaboración del informe final (2 quincenas).

### Cronograma de Actividades





## 6. RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados de este proyecto, tangibles en el corto plazo, son los siguientes:

- Localización de focos de contaminación del Río en época seca y en temporada lluviosa.
- Diseño de una red óptima de información que permitirá monitorear la contaminación del Río.
- Una prueba del modelo propuesto con un estudio que cuantifica el efecto de la presencia masiva de turistas en la región de Cócora en época de alta temporada, a través de un Kriging de las diferencias que se presentan en cada variable entre los días de mínima y máxima afluencia de turistas a la zona.
- Desarrollo y prueba de una metodología para estudiar y monitorear la contaminación de fuentes hídricas, que puede ser aplicada en otros sitios del país.
- Desarrollo de un programa de computación para la construcción de redes de monitoreo.

Un resultado igualmente valioso, pero no tangible en el corto plazo, es la iniciación y formación de un grupo de personas, jóvenes investigadores, en el trabajo investigativo

## **7. RECURSOS**

### **7.1. Humanos**

Los investigadores principales del proyecto son LUIS HERNANDO HURTADO T., MARIA DOLLY GARCIA G. y GLADYS ELENA SALCEDO E., profesores del Programa de Matemáticas y Computación de la Universidad del Quindío, quienes tendrán una dedicación de medio tiempo para el desarrollo de esta actividad.

Se contratarán auxiliares de investigación para el trabajo de digitación y programación, con dedicación de medio tiempo, mientras dure el proyecto; también dos auxiliares para el trabajo de campo, con vinculación ocasional.

Se contratará una asesoría especializada para dirigir y supervisar la ubicación de los puntos de muestreo iniciales y la toma de las muestras, su vinculación también será ocasional.

Se contratará el levantamiento planimétrico del Río en la zona de estudio.

### **7.2 Técnicos**

- Un computador permanentemente disponible para el proyecto.
- Adquisición de software: GS plus, Geopath y S- plus.

- Adquisición de bibliografía sobre modelos lineales generalizados y geoestadística.
- Los análisis químicos y bacteriológicos serán contratados al igual que el levantamiento planimétrico

### 7.3. Financieros

El proyecto tiene un costo total de \$47`600.000 y para el manejo de los recursos se tendrá en cuenta lo siguiente:

- La administración del proyecto y el manejo de los fondos estará a cargo de la Universidad del Quindío a través de la Oficina de Proyectos de Investigación.
- Las relaciones entre las entidades financiadoras, en caso de resultar alguna diferente a la Universidad del Quindío, y la ejecutora del proyecto se manejarán a través de convenios.
- Se considera como fecha de iniciación del proyecto el día en que las entidades financiadoras, entreguen a la tesorería de la Universidad por lo menos el 50% de los costos del proyecto.
- Una vez terminado el proyecto el equipo de computación y la bibliografía pasarán a ser propiedad de la Universidad del Quindío, pero el software podrá ser compartido con las entidades financiadoras.
- Las entidades financiadoras serán los propietarios de los resultados de la investigación y cualquier publicación o utilización de los mismos deberá contar con su autorización.

En el cuadro que aparece a continuación se muestra una distribución de los costos por rubros y las posibles fuentes de financiación.

### DISTRIBUCIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO POR RUBROS

RUBROS	COSTO
<b>Personal de investigadores</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tres investigadores principales, Universidad del Quindío(medio tiempo)</li> </ul>	\$20' .000.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos auxiliares de Investigación (medio tiempo)</li> </ul>	\$7'200.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuatro auxiliares para trabajos de campo(contrato)</li> </ul>	\$4'800.000 \$1' 000.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrato de asesoría para dirigir y supervisar la ubicación de puntos de muestreo y toma de muestras</li> </ul>	\$4'000.000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamiento planimétrico de la zona de estudio</li> </ul>	Total gastos personal \$37'000.000

<b>Equipos</b>		
• Compra de computador	\$3'000.000	
• Compra software	\$5'200.000	
	Total equipos	\$ 8'200.000
<b>Otros gastos</b>		
• Procesamiento químico y bacteriológico de las muestras	\$1'000.000	
• Bibliografía	\$600.000	
• Papel y Tonner para la impresora	\$200.000	
• Gastos de viajes	\$ 400.000	
• Elaboración de informes	\$ 200.000	
	Total otros gastos	\$2'400.000
	<b>Total del Proyecto</b>	<b>\$47'600.000</b>

## BIBLIOGRAFÍA

- Bolgiano N.C. and others, 1989. Evaluation of the Kriging Model for Abundance Estimation of Marine Organisms. Technical Report No.89-0601. Pennsylvania State University P.A.
- Cressie, N.A.C 1993. Statistics for Spatial Data. John Wiley and Sons, N. Y.
- Hurtado L.H., García M.D., 1999. Estimación del Horizonte de Autocorrelación Espacial: una aplicación a variables físico - químicas en la Ciénaga Grande Santa Marta, Colombia. Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín. Nº 28, 125 – 136.
- Kern, J.W.,1996. Statistical Analysis of GIS and Spatially Correlated Field Data. Department of Statistics Laboratory Report.
- Krige, D.G.,1951. A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems at the Witwaterstrand. Master thesis, University of Witwaterstrand.
- Myers, D.E.,1988. Multivariate Geostatistics for Environmental Monitoring. Sciences de la Terra, V 27, p. 428-441.
- Samper C. F. Carrera R. J (1990) : Geoestadística, Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona España.
- Thompson S.K. (1992) : Sampling, John Wiley and Sons, New York.
- Warrick, A.W. and Myers D.E. 1987. Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations. American Geophysical Union. p. 495-499.