
CONTAMINACION DEL RIO CAUCA UN MODELO DE PROGRAMACION LINEAL Y UNA PROPUESTA DE SOLUCION

Luciano Peña Durán M. Sc.
Profesor Titular
Facultad de Ingeniería
Universidad del Valle
Cali Colombia

RESUMEN

El presente artículo es el resultado de un trabajo conjunto emprendido por la Universidad del Valle y la Universidad de Tulane, con la estrecha colaboración de las Empresas Municipales de Cali (EMCALI) y de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CVC). En este artículo se resumen los planteamientos y resultados del proyecto, los cuales han sido consignados en los documentos oficiales (1) y (2) publicados por Univalle y la Universidad de Tulane.

Este estudio está relacionado con la contaminación del río Cauca. Se trata de precisar el problema existente, determinar la máxima carga orgánica permisible y el grado de tratamiento de aguas residuales que debe ser requerido a cada usuario del río como cuerpo receptor de aguas residuales y así mismo formular algunas sugerencias sobre los procedimientos que se deben realizar para establecer un programa de disminución de la contaminación del río. Se utiliza un modelo de programación lineal.

1. EL RIO CAUCA Y LA NATURALEZA DE SU CONTAMINACION

El río Cauca corre por entre las Cordilleras Central y Occidental, en dirección noreste del país, aproximadamente 1040 kilómetros, antes de desembocar al río Magdalena en un sitio que dista unos 320 kilómetros de la costa Atlántica. El río atraviesa los departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Antioquia y Bolívar. A su paso por el departamento del Valle, 230

km. aproximadamente, (figura 1), riega una de las zonas agrícolas más importantes del país, tierras fértiles con cultivos de caña de azúcar, maíz, frijol, plátano, cacao, algodón, arroz y una gran variedad de frutas tropicales. El departamento del Valle es el mayor productor de azúcar de caña en el país. Cali, la capital del Departamento, se extiende desde las orillas del río, a una altitud de unos 870 m., hasta las faldas de los cerros de la cordillera Occidental, con altitud aproximada de 1200 m. La población actual es estimada en 700.000 habitantes y la rata anual de crecimiento es alrededor del 8%. La temperatura media anual es de 25 grados centígrados. La ciudad tiene dos plantas de purificación: La planta de "San Antonio", cuya fuente de abastecimiento es el río Cali, contruida en 1928, y la planta del Cauca que se abastece con aguas del río Cauca, la cual tiene una capacidad mayor que la de San Antonio y está en operación desde 1956. En la región hay dos estaciones secas de tres meses de duración, cada una de las cuales alterna con dos estaciones de lluvias. Enero, Febrero y Marzo, forman una estación seca; Abril, Mayo y Junio una de lluvias; Julio, Agosto y Septiembre, una estación seca (la más severa); y Octubre, Noviembre y Diciembre, una de lluvias.

La primera fase del estudio fue efectuada en el verano de 1963. Se hizo una inspección sanitaria (figura 2). El examen de las aguas residuales que descargan en el río fue practicado en el período de Junio hasta el 15 de julio de 1963. La inspección se extendió en un trayecto del río de 81.3 Km. de la estación 1 (73.7) hasta la estación 10 (155.0) y fue dedicada a establecer los orígenes y las cantidades de desperdicios descargados en el río.

RIO CAUCA

SECTOR EL VALLE DEL CAUCA

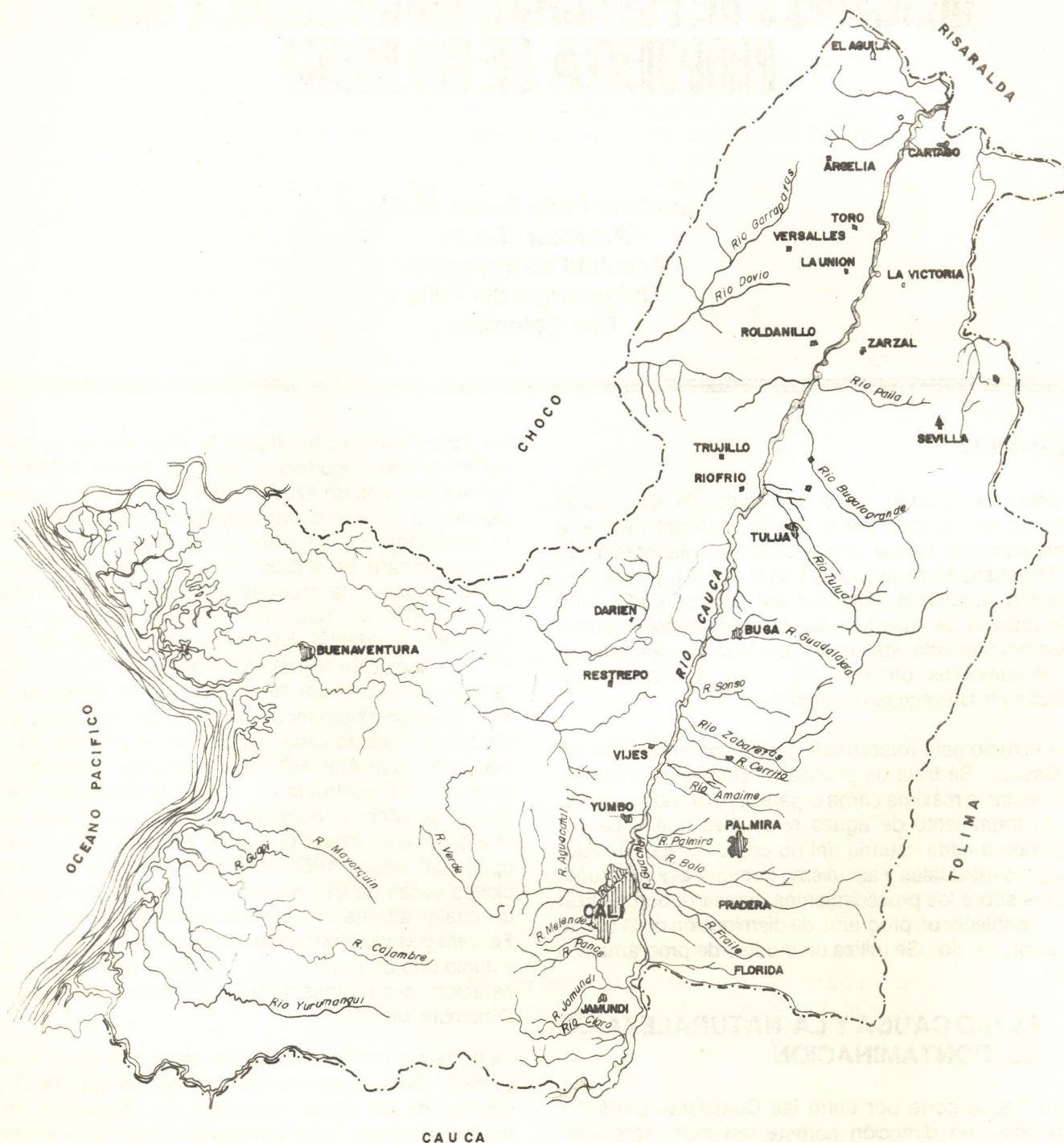


FIG. 1. Diagrama del río Cauca haciendo énfasis en el sector comprendido en el Valle político, colocando las ciudades del Valle más importantes y los ríos de ambas vertientes

RIO CAUCA SECTOR DE ESTUDIO

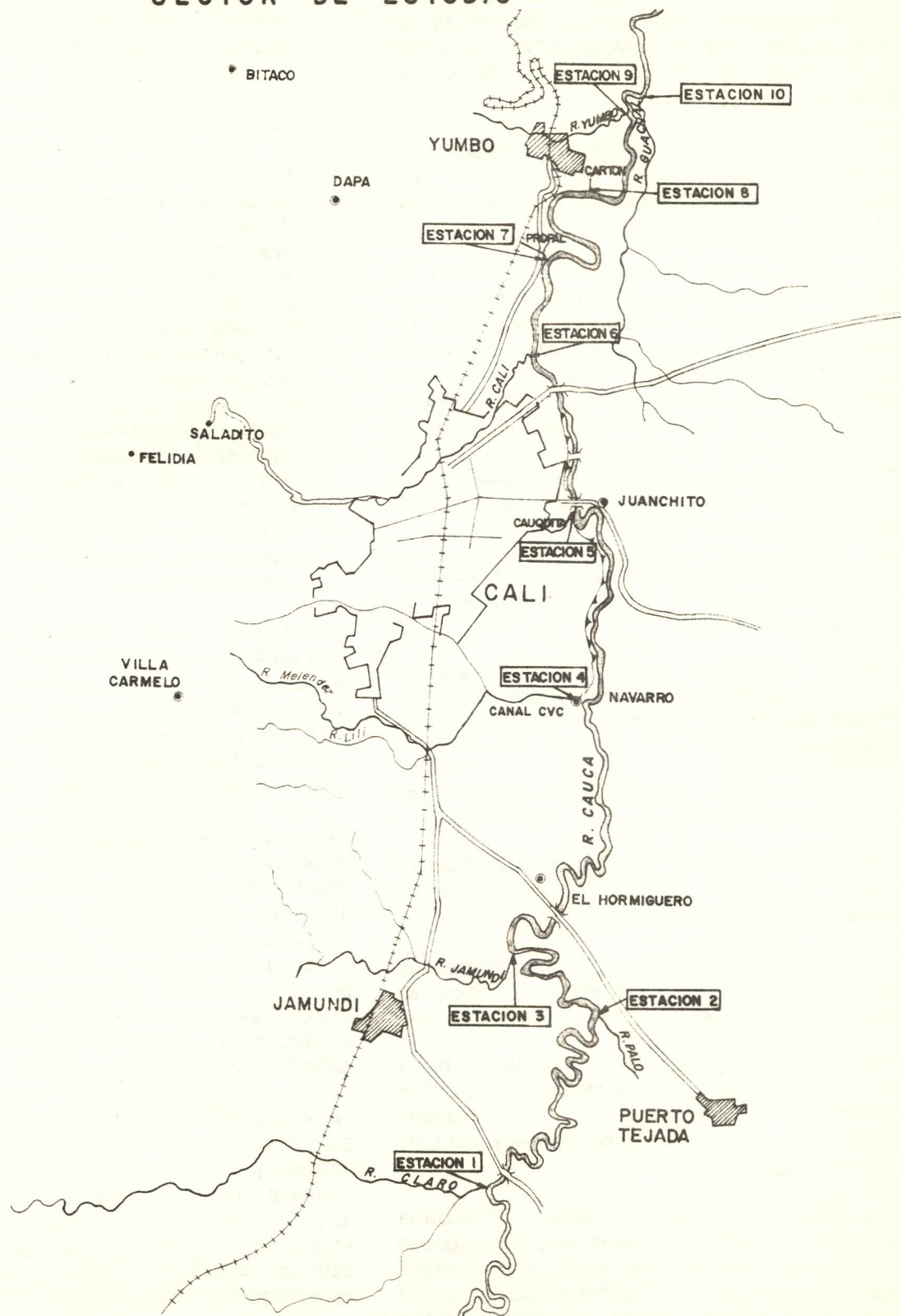


FIG. 2. Diagrama del río Cauca haciendo énfasis en el sector comprendido entre la desembocadura del río Claro y Palmira, señalando con convenciones en las diez estaciones de análisis

La inspección del río se efectuó del 25 de junio hasta el 12 de septiembre del mismo año. Las muestras se tomaron de 13 estaciones en un trayecto del río de 133.5 Km. de largo. Su objeto fue determinar las condiciones bacteriológicas, químicas y físicas del río y su capacidad de autodepuración.

El río Cauca ha sido usado y es en la actualidad usado extensamente como fuente de abastecimiento para consumo humano, agrícola e industrial de aguas residuales.

La ciudad de Cali lo usa como principal fuente de abastecimiento del acueducto y también lo usan: la planta termoeléctrica de Anchicayá para fines de enfriamiento y otras industrias para diversos fines. En sectores rurales el agua cruda es utilizada para fines domésticos y también para irrigación y para abreviar el ganado. El río sirve, en la vecindad de Cali de arenal para la industria de la construcción. También es empleado para los deportes de natación y pesca. Como receptor de aguas residuales es usado considerablemente por la ciudad y por las industrias.

Durante los últimos años se ha observado inicios de una considerable polución en el río, en épocas de caudal mínimo, por medio de:

- a. Un olor objetable y una capa de espuma en la superficie de agua, a lo largo de extenso trecho, aguas abajo de los sitios de descarga de aguas residuales.
- b. Peces muertos que han sido vistos algunas veces durante la estación seca.
- c. Un crecido número de organismos coliformes (NMP* por 100 ml) en el sitio de la bocatoma del acueducto de Cauca.

De acuerdo con los resultados de una inspección sanitaria realizada en desarrollo de los trabajos, se puede afirmar lo siguiente:

1. En el primer trecho del río, de la estación 1 hasta la estación 5, las aguas residuales descargadas tienen las características de aguas negras domésticas. El OD (Oxígeno Disuelto) varía de 6.5 a 5.9 mg/l.
2. En el segundo trecho, de la estación 6 hasta la estación 10, las aguas residuales descargadas tienen el carácter de "municipal" e "industrial". La ciudad de Cali y las fábricas de pulpa y papel (Propal y Cartón de Colombia) contribuyen con 75% de la carga media del río (medida en tér-

minos de DBO). Las aguas residuales del área industrial conocida con el nombre de "ACOPI", también contribuyen con una carga orgánica sustancial (1). El valor mínimo del OD es menor que 2.0 mg/l y un valor de 0.5 mg/l fue observado en una sola muestra en un sitio arriba del "Paso de la Torre" (Kms 159.7).

3. El agua en el primer trecho (estación 1 a estación 5) cumple con los requisitos de las aguas de clase B establecidos y publicados en el libro *"Minimum Water Quality Criteria for Streams in the Potomac River Basin"*. Esto quiere decir, que el agua es utilizable para abastecimientos de agua provistos con tratamiento completo, para procesos industriales y para fines recreativos tales como la natación, la pesca, etc. (+)
4. En el segundo trecho, de la estación 6 hasta la estación 10, el agua no es de calidad satisfactoria ni para abastecimientos ni para natación, además de no cumplir con las normas mínimas para fines industriales. Esta agua tampoco satisface los requisitos correspondientes a "La clase D" que es la de calidad inferior.

De lo expuesto anteriormente es fácil concluir que el río está en estado crítico de polución. Su capacidad de autodepuración ha sido agotada casi completamente. Si se permite que continúen las actuales circunstancias y se descargan en el río cantidades adicionales de aguas residuales, las condiciones anaeróbicas predominarán y se producirán molestias en todo el sector.

La descarga de aguas residuales en las corrientes de agua, por encima de su capacidad de asimilación, impone un valor del agua más alto para los usos, aguas abajo. Para el empleo en los abastecimientos de agua, los costos de tratamiento aumentan cuando la calidad del agua es inferior y la comunidad tiene que pagar un precio considerable por el uso de agua potable. De manera semejante, para usos industriales, ello causa un elevado costo de producción. Por consiguiente, el daño que así se ocasiona es de gran magnitud.

La disposición adecuada de aguas residuales es uso productivo del agua (5). El empleo razonable, que está limitado por la capacidad de autodepuración de la corriente, preserva recursos y favorece el desarrollo de la producción y del consumo. Por consiguiente, en este caso, el tratamiento de aguas residuales es no sólo aconsejable sino obligatorio para beneficio de la comunidad y de las industrias.

(+) No se considera el alto índice Coliforme en la estación 5 porque la descarga de aguas residuales en ese punto ha sido suprimida.

* NMP: Número más probable.

2. UN MODELO DE PROGRAMACION LINEAL

2.1 SUPESTOS

1. Sea n el número de descargas de aguas residuales a lo largo del río
2. El caudal del río es constante en cualquier tramo.
3. Las variaciones del caudal en el río ocurren solamente en el origen de un nuevo tramo.
4. Los caudales de aguas residuales y sus características, son conocidos.
5. Los costos de tratamiento de aguas residuales crecen linealmente con el grado de tratamiento, para cualquier nivel dado de flujo de aguas residuales.
6. La disminución de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) en la corriente receptora, se afecta geométricamente con relación al tiempo.

2.2 VARIABLES Y PARAMETROS DEL MODELO

Se puede indicar como variable de decisión el grado de remoción de la DBO, para cada descarga de aguas residuales.

j = Indica la estación donde se produce una descarga.

P_j = Valor de la DBO (en población equivalente PE) que se origina por la descarga en el punto j , si no hubiese tratamiento.

q_j = Caudal de aguas residuales de la descarga en el punto j .

X_j = Remoción de la DBO, (en fracción) producida por una planta de tratamiento en el punto j ($0 \leq X_j \leq U_j$)

$Y_j = (1 - X_j) P_j$ = Descarga de DBO en el punto j (en fracción).

U_j = Límite superior (fracción decimal) de la eficiencia de la planta de tratamiento en el punto j , ($U_j \leq 1.0$).

p_{ji} = Relación de descomposición; fracción de la DBO en el punto j , todavía presente en el punto i , ($0 < p_{ji} \leq 1$) $1 \leq j \leq i \leq n$.

Q_j = Caudal del río en el tramo: $(j, j + 1)$.

C_j = Costo de la planta de tratamiento en el punto j , con una eficiencia de remoción de la DBO igual a X_j .

B_j = Carga máxima permisible de DBO en el tramo $(j, j + 1)$ en población equivalente por m^3 por segundo, $(PE / m^3 / seg)$.

En la **figura 3** se muestra un diagrama de las variables de decisión X , y de los flujos y cargas contaminantes.

2.3 LA FUNCION OBJETIVA

Se supone que el costo C_j de la planta j para un flujo = q_j es de:

$$C_j = c_j X_j$$

El costo total de n plantas de tratamiento es:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{j=1}^n C_j$$

$$\text{ó } C = \sum_{j=1}^n c_j X_j$$

Se ha encontrado (6) que el costo del tratamiento de aguas residuales, varía linealmente con el grado de remoción de la DBO, de acuerdo con la siguiente función:

$$C = f k q^a X \text{ donde:}$$

f = Índice de precios.

k = Costo básico de una planta de una unidad de caudal

q = Capacidad de la planta en unidades de caudal.

a = Factor de economía de escala.

X = Grado de remoción de la DBO (en fracción).

Luego,

$$c_j = \frac{C}{X_j} = f k (q_j)^a$$

2.4 RESTRICCIONES

a) De Calidad:

En cada desembocadura de aguas residuales, se debe cumplir la limitación de calidad, B_j .

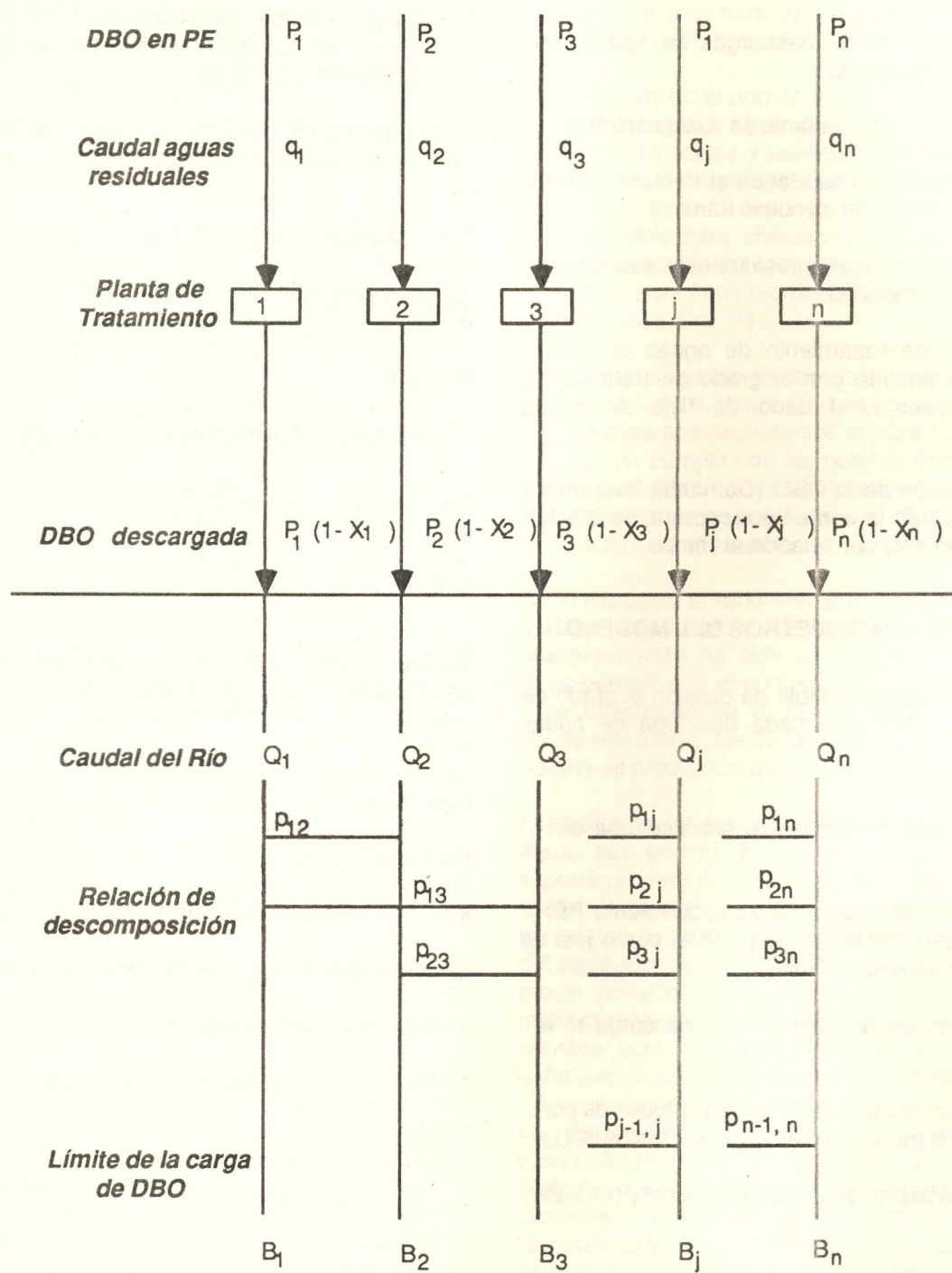


FIGURA 3

Primera limitación (punto 1).

$$\frac{\text{Descarga de DBO de la planta 1}}{\text{Caudal total en el punto 1}} \leq B_1$$

$$\therefore \frac{P_1(1 - X_1)}{Q_1 + q_1} \leq B_1$$

Segunda limitación (punto 2).

$$\frac{\text{DBO restante planta 1 + descarga de DBO planta 2}}{\text{Caudal total en el punto 2}} \leq B_2$$

$$\therefore \frac{P_1 p_{12}(1 - X_1) + P_2 p_{23}(1 - X_2)}{Q_1 + q_1 + q_2} \leq B_2$$

EFFECTOS DE LA DESCOMPOSICION

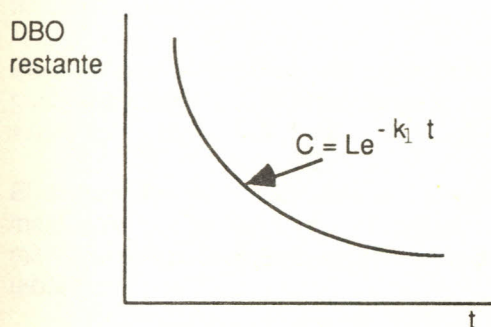


FIGURA 4.a

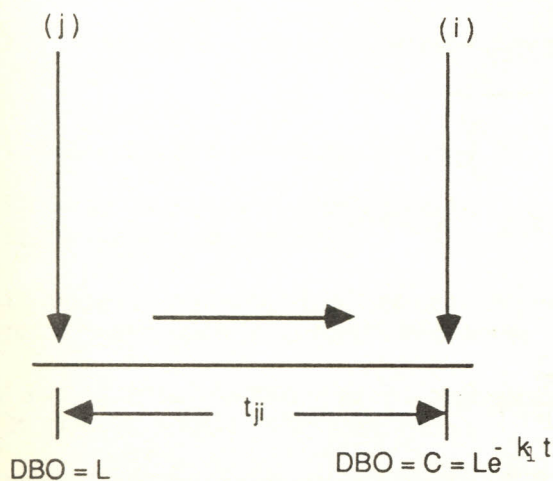


FIGURA 4.b

$$p_{ji} = e^{-k_j t_{ji}} \leq 1$$

Cuando se tiene $j = i$ quiere decir que $t_{ji} = 0$ y $p_{ji} = 1$; por consiguiente, $L = C$.

k_j = Factor de desoxigenación de las aguas residuales, en j .

t_{ji} = Tiempo de paso entre los puntos j, i .

Tercera limitación (punto 3).

$$\therefore \frac{P_1 p_{13}(1 - X_1) + P_2 p_{23}(1 - X_2) + P_3 p_{33}(1 - X_3)}{Q_1 + q_1 + q_2 + q_3} \leq B_3$$

Nota: De acuerdo con lo anterior, $P_{33} = P_{jj} = 1$.

Limitación de orden (i) (punto i).

$$\frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji} (1 - X_j)}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} \leq B_i$$

$$\frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji}}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} - \frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji} X_j}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} \leq B_i$$

Transponiendo:

$$-\frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji} X_j}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} \leq -\frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji}}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} + B_i$$

Multiplicando por (-1):

$$\frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji} X_j}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} \geq \frac{\sum_{j=1}^i P_j p_{ji}}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} - B_i \quad (I)$$

Notas:

- El primer término del miembro de la derecha de la desigualdad (I) es la carga de polución equivalente, ($PE/m^3/seg$) que existiría en el punto i si no hubiera tratamiento.
- El segundo término de la derecha, es la carga de polución admisible en el punto i .
- El lado izquierdo de la desigualdad, representa la carga de polución que debe ser removida.
- Los coeficientes de las variables X_j son todos positivos, puesto que ellos son el producto de coeficientes no-negativos.
- Si el valor de la polución en un punto n excede al valor de la polución admisible, el miembro de la derecha será positivo. Si el valor admisible de polución excede al valor de la polución, el miembro de la derecha será negativo.

En general:

$$a_{ij} = \frac{P_j p_{ji}}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j} \quad \begin{matrix} j \leq i \\ j > i \end{matrix} \Rightarrow a_{ij} = 0$$

$$y, b_i = \sum_{j=1}^i a_{ij} - B_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Entonces las restricciones de calidad, serán:

- (1) $a_{11}X_1 \dots \geq b_1$
- (2) $a_{21}X_1 + a_{22}X_2 \dots \geq b_2$
-
- (n) $a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + a_{n3}X_3 + \dots + a_{nn}X_n \geq b_n$

b) De capacidad:

Si U_j es el límite superior de la eficiencia de remoción de la DBO en la planta j , las limitaciones de capacidad, pueden ser expresadas así:

$$X_j \leq U_j, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

c) De no-negatividad:

El grado de remoción de la DBO en cada planta debe ser positivo.

Luego:

$$X_j \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

2.5 MODELO DE CONTAMINACION EN TERMINOS DE LA PROGRAMACION LINEAL

El planteo del problema, de acuerdo con la técnica de la programación lineal, es como sigue:

Encontrar los valores $\{X_j\}$ que hacen mínima la función

$$\sum_{j=1}^n c_j X_j$$

Sometida a:

$$(I) \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i, \quad \begin{matrix} j = 1, 2, 3, \dots, n. \\ j \leq i \end{matrix}$$

$$(II) \quad X_j \leq U_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

$$(III) \quad X_j \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

En donde:

$$a_{ij} = \frac{P_j p_{ji}}{Q_i + \sum_{j=1}^i q_j}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

$$j \leq i$$

$$b_i = \sum_{j=1}^i q_{ij} - B_i$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

$$j \leq i$$

2.6 SOLUCION Y PROCESO DE CALCULO

En la solución del problema, se aplicó el modelo matemático de Deininger (6). Un esquema del problema, se muestra en la figura 5. Se muestran los parámetros: P_j , K_j , q_j , Q_j , para cada estación. El valor de B_j , se asume como de $B_j = 48 \text{ kg-d /m}^3/\text{s}$, equivalente a $3.0 \text{ lb-d /pie}^3/\text{s}$ $j = 1, \dots, n$, de acuerdo a patrones internacionales (5). En el análisis de sensibilidad se modificó este valor.

Los costos de las plantas de tratamiento de aguas residuales fueron calculadas por medio de la ecuación:

$$C = 9.1 P^{-0.23}$$

C: Costo relativo, per cápita.

P: Población.

Esta ecuación fue deducida de datos sobre costos de construcción en los EE.UU., Inglaterra y Alemania (6), puesto que el país no se tiene experiencia en esta estimación por sustracción de materia; no se ha construido ninguna planta.

Para el cálculo de población equivalente se hace el siguiente supuesto: DBO por cabeza; por día = 0.22 lbs = 0.10 kg.

El cálculo de los coeficientes del problema de programación lineal se hace en el siguiente orden; en el mismo orden mencionado aparecen las columnas en la tabla 1.

- 1) Los valores de la abcisa de la estación correspondiente.
- 2) Los valores de flujo del río Q_j (inspección).
- 3) Los valores de flujo de las respectivas descargas (inspección).
- 4) Los valores totales de flujo del río $Q_j + \sum_{k=1}^{j-1} q_k$
- 5) La carga contaminante (DBO) en el río Cauca en kg/día (inspección y laboratorio).
- 6) La carga contaminante (DBO) en el afluente de la respectiva estación (inspección y laboratorio).
- 7) La carga contaminante que se descargará en el río en caso de no existir tratamiento.
- 8) La carga de DBO en población equivalente (PE).
- 9) El valor de K_j (coeficiente de desoxigenación) (inspección y laboratorio).

- 10) El costo en unidades monetarias:

$$C_j = 9.1 * P_j * P_j^{-0.23} = 9.1 P^{0.77}$$

- 11) El tiempo que toma el agua en el trayecto entre las estaciones j y $j+1$, en horas. Se supone una velocidad constante.

$$0.92 \text{ m/s} = 3.29 \text{ km/h} = 79.0 \text{ km/d}$$

- 12) La carga contaminante máxima. Se supone constante, pero es posible variarla para el análisis de sensibilidad.

- 13) El cálculo del valor p_{ji} $j = 1, \dots, 10; i = 1, \dots, 10$

$$p_{ji} = e^{-K_j t_{ji}}$$

- 14) El cálculo de los coeficiente a_{ij} .

- 15) Los componentes del problema son:

- a) La función objetiva.
- b) Un conjunto de 20 restricciones.
- c) Diez variables ordinarias $x_1, \dots, x_{10}$
Veinte variables de holgura $x_{10}, \dots, x_{30}$
Diez variables artificiales $x_{31}, \dots, x_{40}$

El problema fue resuelto en un computador. El programa se incluye en el informe oficial del proyecto.

3. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Como R.A. Deininger señala, este tipo de problema una vez fijado el límite de polución deseable, puede ser resuelto de tres modos (6):

Solución 1: Requerir el mismo grado de tratamiento para cada planta.

Solución 2: Permitir en cada descarga tanto caudal como sea posible sin que se viole el criterio de calidad.

Solución 3: Idear un sistema de tratamiento de aguas residuales el cual permita mantener la deseada calidad del agua con el mínimo costo de tratamiento.

"La solución 1 es actualmente la más común... Ella no tiene en cuenta las economías de escala en el tratamiento".

"La solución 2 favorece al usuario aguas arriba, puesto que él puede descargar aguas residuales hasta que la capacidad de asimilación del río se agote.

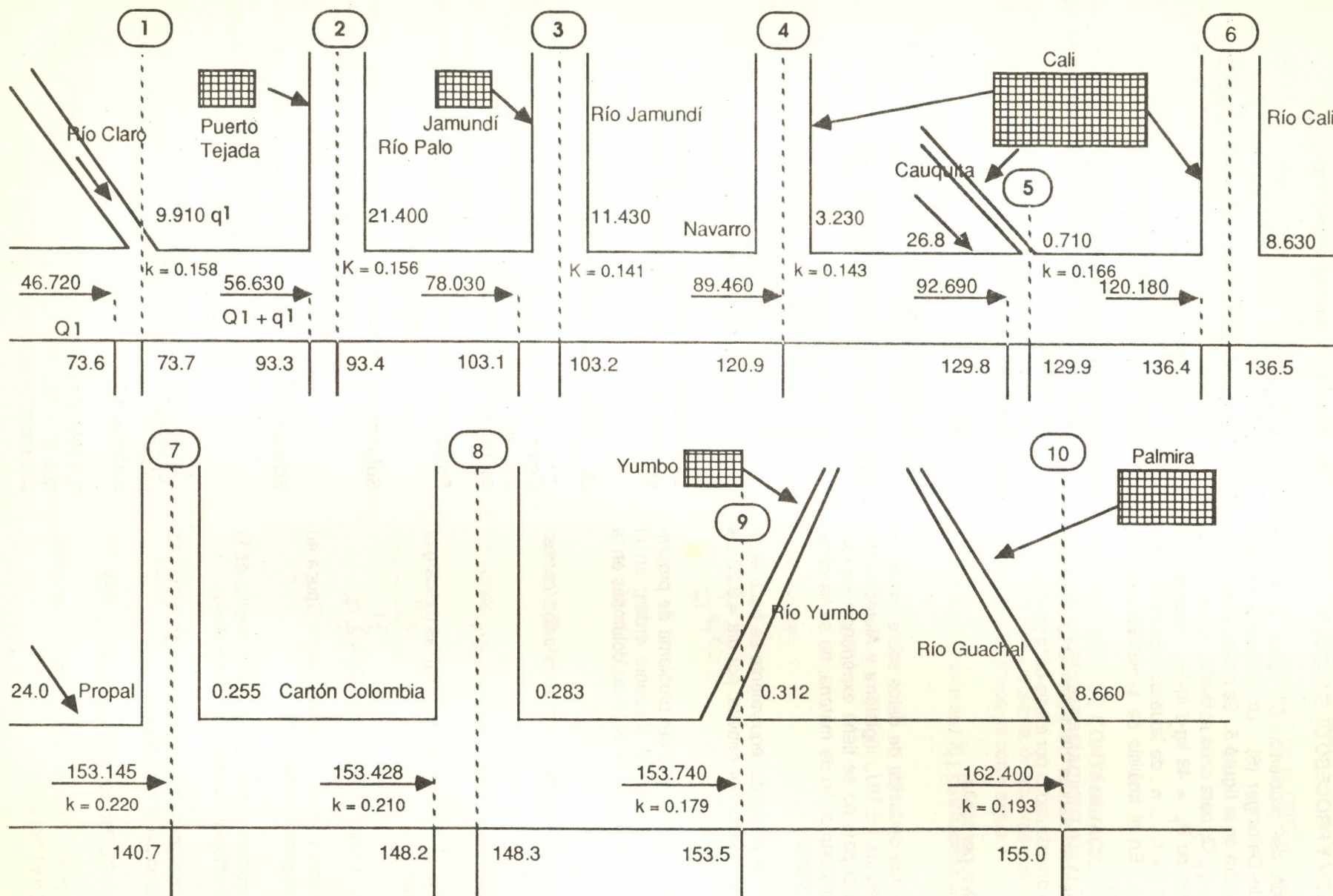


FIG. 5 ESQUEMA GENERAL DEL MODELO.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ESTACION	DESCRIPCION	Km	Q_j	q_j	$(Q + \sum q)$	DBO en	DBO en	P_j	DBO en	K_j	Costo	$t_{j,j+1}$	Límite
						el RC	Descarga		PE				Contam. B_j
			(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(Kg/d)	(Kg/d)	(Kg/d)		(1/día)	(unld.)	(hr.)	(PE/m ³ /s)
1	Rio Claro	73,7	46,72	9,910	46,720	7303	257	7560	76000	0,158	51900	6,00	48,2
2	Rio Palo	93,4	46,72	21,400	56,630	9798	1852	1852	18500	0,156	17600	2,98	48,2
3	Rio Jamundi	103,2	46,72	11,430	78,030	9888	939	939	9400	0,141	10400	5,41	48,2
4	Canal Navarro	120,9	46,72	3,230	89,460	7802	3506	3506	35200	0,143	28900	2,70	48,2
5	Cauquita	129,9	73,50	0,710	92,690	11612	14252	14252	143000	0,166	83000	2,00	48,2
6	Rio Cali	136,5	73,50	8,630	120,180	36470	24743	24743	248000	0,220	129000	1,31	48,2
7	Propal	140,7	97,58	0,255	153,145	41200	24585	24585	246400	0,210	131000	2,27	48,2
8	Carton Colombia	148,3	97,58	0,283	153,428	59600	16556	16556	166000	0,179	95000	1,73	48,2
9	Rio Yumbo	153,5	97,58	0,312	153,740	57700	277	277	2780	0,193	4100	0,33	48,2
10	Rio Guachal	155,0	97,58	8,660	162,400	53799	2442	2442	24500		21800		48,2

TABLA - 1

Resumen de los resultados de la inspección sanitaria y cálculo de constantes para el modelo verano 1963 (agosto, septiembre).

Los usuarios, aguas abajo, serían obligados a disponer de un tratamiento de muy alto grado".

"La solución 3 conduciría a un sistema que tendría el mínimo costo total de tratamiento. Pero como en un sistema de tal naturaleza las plantas de tratamiento serían construidas solamente en los sitios donde resulten más económicas, este sistema requiere que se cargue con impuestos a los usuarios y que cada uno sostenga su parte proporcional de los costos".

La solución 3 ha sido obtenida en este estudio por medio del modelo matemático ya explicado.

El problema fue resuelto para dos caudales del río, en la estación 1:

- Caudal de 46.720 m³/seg como promedio de los meses de julio y agosto.
- Caudal de 113.836 m³/seg como promedio de los meses de agosto y septiembre.

Para cada uno de estos dos caudales se obtuvieron seis series de resultados, por medio del computador. Los límites de polución usados fueron: 40, 48, 64, 80, 96, 128, 160, Kg-d-DBO/m³/seg.

En ambos casos se puede observar que para los límites más bajos de polución (40 Kg-d-DBO/m³/seg para 113.836 m³/seg y 48 Kg-d-DBO/m³/seg para 46.720 m³/seg) se requiere obtener de casi todas las plantas el mayor grado de tratamiento (0.95), que es el límite superior de eficiencia fijado en el problema para cada una y el costo de tratamiento es el más alto, en cada caso: 507574.44 unidades de costo para el caudal de 46.720 m³/seg y 501548.62 unidades de costo para el caudal de 113.836 m³/seg.

A medida que el límite de polución crece, el número de plantas y el grado de tratamiento decrece; el costo de tratamiento decrece también. Para el límite de polución más alto (160 Kg-d-DBO/m³/seg) los costos son: 370124.37 unidades para el caudal de 46.720 m³/seg y 321594.44 para el caudal de 113.836 m³/seg.

Comparando los costos de tratamiento para los dos caudales diferentes, con igual límite de polución en cada caso, se observa que el costo de tratamiento decrece a medida que el caudal crece. La variación del costo total de tratamiento de aguas residuales con el límite de polución, para los dos caudales indicados, se muestra en el gráfico de la figura 6.

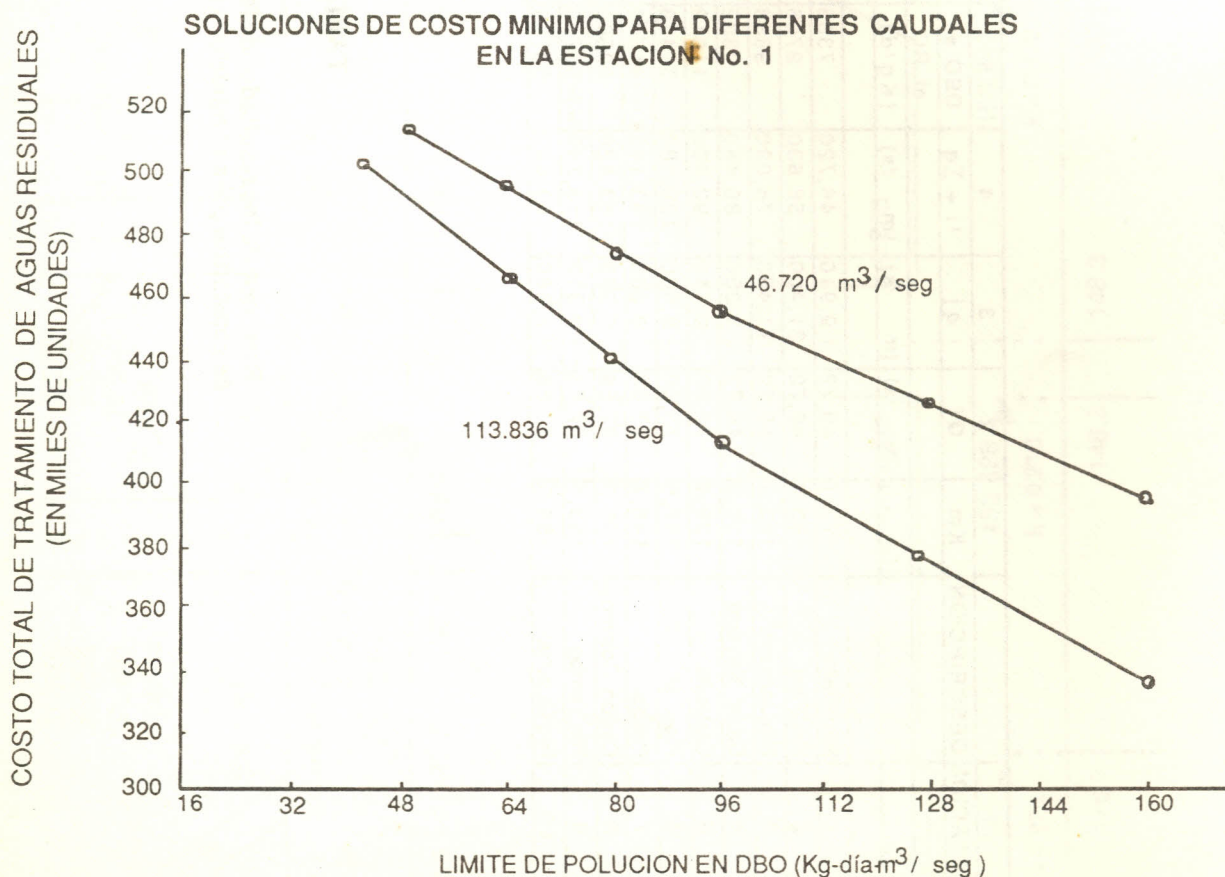


FIGURA 6

4. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

De este estudio se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1) En el caso considerado, el tratamiento de las aguas residuales se hace indispensable. De ahora en adelante, no debe permitirse ninguna descarga de aguas residuales sin previo tratamiento.
- 2) A causa de las condiciones críticas de polución, es de suma importancia emprender inmediatamente el estudio de un programa de reducción de polución del río.
- 3) Es necesario hacer otra inspección sanitaria. En ésta debe hacerse una investigación sobre los depósitos de materia orgánica en el río, con el fin de determinar la demanda bentónica. Esta sugerencia se hace porque en la inspección que se hizo del río, se encontró que una considerable cantidad de materia orgánica era removida de la corriente de agua por sedimentación, entre las estaciones 165.3 y 170.7.
- 4) Determinar la polución límite con base en el nivel mínimo de OD requerido por las especies de peces presentes en el río.
- 5) Hacer un estudio de costos de tratamiento de aguas residuales.
- 6) Hecho lo anterior, resolver el problema empleando el mismo programa de computador usado en este estudio. De esta manera se puede determinar el óptimo grado de tratamiento para diferentes caudales, en cada estación. (+)
- 7) Con relación al tratamiento mismo de aguas residuales sería deseable hacer alguna investigación sobre lagunas de estabilización. Estas pueden ser una solución económica en el tratamiento de aguas industriales y en el de aguas negras domésticas procedentes de pequeñas comunidades.

- 8) También es deseable un estudio sobre el adecuado tratamiento de aguas residuales procedentes de la ciudad de Cali.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) DONALDSON, J.E.; DUNN, L.M.; MACDONALD, F.W.; SANTAMARIA, L.; PETERSON, J.C.S. "A Study of the Pollution and the Natural Purification of the Cauca River". Tulane University.
- (2) DUNN, LESLIE M. "A Study of the deoxidation and Reaeration Characteristics of the Río Cauca. Thesis submitted to the Graduate School of Tulane University, for the degree of Master of Science, (1964).
- (3) Reader's Digest. "Almanac and Yearbook", (1969).
- (4) DONALDSON, JAEQUES E. "An Investigation of Water-Borne Wastes Contributing to the Pollution of the Río Cauca" Thesis submitted to the Graduate School of Tulane University, for the degree of Master Science, (1963).
- (5) KNEESE, ALLEN V. "The Economics of Regional Water Quality Management". The Johns Hopkins Press, Baltimore.
- (6) DEININGER, ROLF A. "Water Quality Management - The Planning of Economically Optimal Pollution Control Systems" Doctoral dissertation NorthWestern University-Evanston, Illinois, (1965)

Para mayor aclaración de los antecedentes de este artículo, por favor revisar el editorial de este número.

(+) NOTA: Los caudales deben ser especificados por su frecuencia, en términos de porcentaje del tiempo en el cual ellos son excedidos en el año.