

Aplicación de un modelo numérico para la priorización de la inversión en tratamiento de aguas residuales en Colombia

Sergio Barrera
Mario Díaz-Granados
Juan Pablo Ramos-Bonilla
Luís A. Camacho
Ramón Rosales
Nicolás Escalante
Mario Torres

Profesores Departamento de Ingeniería Civil
y Ambiental, Universidad de los Andes.

Recibido 3 de septiembre de 2005, aprobado 29 de octubre de 2005.

PALABRAS CLAVES: Modelación, Priorización Inversiones, Saneamiento

KEY WORDS: Modelling, Investment Prioritization, Wastewater Treatment



RESUMEN Colombia no cuenta con un proceso adecuado para el planeamiento de la inversión en tratamiento de las aguas residuales municipales. Las entidades de los órdenes Nacional, regional y municipal tienen criterios divergentes con respecto a la asignación de los recursos. Más aún, hay una carencia de herramientas para soportar las decisiones en información ambiental, financiera, social y técnica. En este artículo se presenta un modelo computacional para asistir a nivel nacional el proceso de toma de decisiones en la planeación del tratamiento de las aguas residuales municipales en Colombia. Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener una red hídrica estructurada de todo el país, a partir de un modelo de elevación del terreno con información topográfica de origen satelital. A partir de ella y de la información hidrológica del país se modelaron los caudales, la DBO5, el oxígeno disuelto, las concentraciones de bacterias coliformes en toda la red de drenaje, analizando diferentes escenarios de tratamiento. Las longitudes de la red hídrica con problemas de oxígeno disuelto en la red hídrica modelada fueron notoriamente menores que aquellas con problemas de contaminación bacteriológica. Utilizando análisis multivariado para toma de decisiones bajo múltiples criterios, se analizaron diferentes escenarios de tratamiento para determinar su efectividad en la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua. Como resultado se obtuvieron priorizaciones de la inversión en tratamiento a nivel de los municipios del país. La herramienta para la toma de decisiones integra los objetivos de todas las entidades involucradas con el tratamiento de las aguas residuales municipales, resolviendo los conflictos entre entidades y maximizando el beneficio ambiental generado por la inversión en el sector.

ABSTRACT Colombia has lacked an adequate planning process for the design, construction, and operation of wastewater treatment facilities in most of the municipalities. National, regional and local agencies have conflicting criteria for managing this sector. Furthermore, there is a lack of adequate tools to support decisions with appropriate environmental, financial, social, and technical information. In this paper, a computer model is presented as a tool to support at a national level the decision making process for planning municipal wastewater treatment facilities in Colombia. A geographical information system was used to obtain a structured river network from a digital elevation model. Modeling flows, dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, and coliform bacteria throughout the entire national drainage network allowed the analysis of several wastewater treatment scenarios, using bacteriological contamination (i.e.: coliform bacteria) as the main indicator of public health risks resulting from wastewater pollution. Total length of oxygen deprived river reaches in the hydrological network was much less than the length of the bacteriological degraded reaches. Using multivariate analysis, different wastewater treatment scenarios were analyzed to determine their effectiveness to mitigate wastewater pollution, based on environmental, socioeconomic and infrastructure criteria. As a result, prioritizations for investment in wastewater treatment plants were obtained at municipal and basin levels. The decision making tool integrates the objectives of the national agencies involved in wastewater management policies, solving the conflicts between agencies and optimizing the use of financial resources for the sector.

1. MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

No existe en la actualidad información estructurada sobre la red hídrica a nivel nacional. A pesar de que hay cartografía digitalizada de bastante precisión, no existe información sistematizada sobre caudales, áreas de drenaje ni conectividad de las corrientes, para analizar el comportamiento de la contaminación hídrica generada por los asentamientos humanos. Se utilizó información topográfica para generar una red hídrica estructurada de todo el país. Se tomó para ello un DEM (Digital Elevation Model) de todo el territorio nacional, que contiene los datos de elevación del terreno para una malla de 3976 por 5390 puntos espaciados entre sí por una distancia de 342 mts. La información fue analizada espacialmente para determinar la red de drenaje asociada con la topografía. El producto de este análisis es una tabla de 80.402 tramos y 82.158 nodos, con las áreas de drenaje asociadas a cada uno de los nodos de la red. En los archivos anexos se muestra la red de drenaje, con los resultados de calidad de la modelación.

1.2. CUANTIFICACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Se elaboró un inventario de cabeceras municipales (1084) con localización, población proyectada al horizonte de la planificación y con las características de los sistemas de tratamiento existentes en la actualidad para cada uno.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno por habitante fue inicialmente adoptada de la literatura especializada como 50 gms/día. Sin embargo, durante el proceso de calibración del modelo se pudo constatar que para las ciudades de mayor tamaño es necesario adoptar un valor menor. Analizando las caracterizaciones existentes para el río Bogotá se constató que la DBO_5 por habitante, que efectivamente llega al río, puede ser tan baja como 30 gms/día. Para el modelo se tomaron valores variables entre estos dos límites, dependientes del tamaño de la población:

Poblaciones menores de 500.000: 50 gms/día
 Poblaciones entre 500.000 y 1'000.000: 43 gms/día
 Poblaciones entre 1'000.000 y 3'000.000: 36 gms/día
 Poblaciones mayores de 3'000.000: 30 gms/día

Para el cálculo de los caudales de aguas negras se consideró la dotación recomendada para diseño en el Reglamento del sector de Agua Potable y Saneamiento (RAS). Para las poblaciones de mayor tamaño se ampliaron los valores de acuerdo con la siguiente tabla:

Poblaciones menores de 2.501: 100 lts/día
 Poblaciones entre 2.501 y 12.500: 120 lts /día
 Poblaciones entre 12.501 y 60.000: 130 lts /día
 Poblaciones entre 60.001 y 500.000: 150 lts /día
 Poblaciones entre 500.001 y 1'000.000: 170 lts /día
 Poblaciones entre 1'000.000 y 3'000.000: 185 lts /día
 Poblaciones mayores de 3'000.000: 200 lts /día

El caudal de aguas residuales producido por cada municipio fue calculado con base en la población proyectada, el consumo per cápita y un factor de retorno de 0.8, y fue asignado al nodo más cercano de la red.

1.3. MODELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Los caudales de las corrientes fueron estimados a partir de información de rendimientos hidrológicos en el territorio nacional. Con base en información de la red hidrológica nacional, se establecieron valores de rendimientos multianuales para el mes más seco del año (Febrero), en todo el territorio nacional. Con esta información y las áreas de drenaje a cada uno de los nodos de la red, se calculó el caudal incremental asociado con cada tramo. Finalmente, los caudales de las corrientes fueron calculados integrando los caudales incrementales y los de aguas residuales, en el sentido de flujo de la red.

Para la modelación de las concentraciones de oxígeno disuelto, DBO_5 y coliformes, se tuvieron en cuenta los siguientes fenómenos, modelados matemáticamente:

- Variación de la presión atmosférica con la altura.
- Variación de la temperatura del agua con la altura.
- Variación de la concentración de saturación de oxígeno con la temperatura y la presión atmosférica.
- Variación de la velocidad del agua en función de la pendiente, el área tributaria, el caudal y el caudal medio multianual.
- Variación de la profundidad de la corriente como función del caudal y la velocidad.
- Variación de las constantes de reaireación con la profundidad, la velocidad y la profundidad
- Variación de las constantes de reaireación, decaimiento de la DBO_5 y decaimiento de coliformes con la temperatura.

Las concentraciones de oxígeno disuelto y DBO_5 fueron encontradas aplicando la modelación tradicional de Streeter y Phelps. Las concentraciones de bacterias coliformes fueron modeladas aplicando un modelo de decaimiento de primer orden.

1.4. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Los resultados de la modelación se presentan en los mapas que se anexan. En los mapas de concentraciones de oxígeno disuelto y porcentaje de saturación, se observa que solamente las ciudades de Medellín, Bogotá y Sincelejo generan condiciones anaerobias en longitudes importantes de la red hídrica. A pesar de que esta última ciudad es de tamaño intermedio, las condiciones de baja precipitación, alta temperatura y bajas pendientes generan un problema de desoxigenación bastante mas severo que en otras zonas del país.

La modelación pone en evidencia que los problemas de oxígeno se resuelven con plantas de tratamiento de aguas residuales en unas pocas ciudades. Con el

fin de extender el análisis de la problemática ambiental asociada con los municipios, se elaboraron mapas de concentraciones de coliformes de acuerdo con los usos del agua definidos en el decreto 1594 del Ministerio de Salud:

Agua Potable: 0 Bacterias/100 mL

Recreativo: menor de 1.000 Bacterias/100 mL

Agrícola: menor de 5.000 Bacterias/100 mL

Potabilizable: menor de 20.000 Bacterias/100 mL

No apta para potabilización: mayor de 20.000 Bacterias/mL

En los mapas de coliformes, todos los tramos que corresponden a la última clasificación se destacan en rojo. Para la definición de las cuencas contaminadas se tuvieron en cuenta los tramos pertenecientes a esta categoría, conectados por la red hídrica. En los archivos anexos se presentan dos de los mapas de resultados, uno de oxígeno disuelto y otro de coliformes.

Para la priorización de los municipios se generaron las siguientes variables para cada municipio:

- Identificador de la cuenca a la que pertenece (104 cuencas contaminadas).
- Distancia entre el municipio y el último punto contaminado de la cuenca (en el que la concentración de coliformes es menor de 20.000/100mL.).
- Concentración de coliformes a la llegada a otro tramo contaminado de la cuenca.

2. PRIORIZACIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

Se aplicaron metodologías estadísticas para asignar a cada municipio una medida de su prioridad, como función del impacto ambiental asociado con su descarga de aguas residuales y con las variables socioeconómicas de la población.

2.2. OBJETIVOS DE LA PRIORIZACIÓN

- Identificar las cuencas con mayores problemas ambientales.
- Identificar los municipios que son causa de los problemas ambientales dentro de estas cuencas.
- Generar un listado con el nivel de afectación de cada municipio sobre los cuerpos receptores de agua residual y su nivel de afectación aguas abajo.
- Definir un orden lógico de inversión en PTAR, a partir de los municipios que contaminan los cuerpos receptores y demás variables que se consideren necesarias para la priorización.

2.3. METODOLOGÍA

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para priorizar la inversión en tratamiento de aguas residuales fueron los siguientes:

- 1) *Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)*: mayor prioridad a municipios de menor NBI. Este criterio es una medida del estado de desarrollo socioeconómico y de la demanda financiera del municipio para hacer inversiones en infraestructura urbana.
- 2) *Cobertura de acueducto (ACU)*: mayor prioridad a municipios con mayor cobertura de acueducto. Este criterio es una medida del estado del sistema de distribución de agua y de secuencia de desarrollo de la infraestructura urbana.
- 3) *Cobertura de alcantarillado (ALC)*: mayor prioridad a municipios con mayor cobertura de alcantarillado. Este criterio es una medida del estado del sistema de recolección de las aguas residuales para conducir las a subsecuentes tratamientos.
- 4) *Planta de tratamiento de agua potable (PTAP)*: mayor prioridad con municipios con PTAP. Este criterio es una medida del estado del sistema de abastecimiento de agua municipal y de la secuencia de inversión en infraestructura urbana.
- 5) *Población (POB)*: mayor prioridad a municipios con mayor población. Este criterio es una medida del impacto potencial del municipio en el cuerpo de

agua receptor, al igual que su demanda económica para la inversión en infraestructura urbana.

6) *Longitud hasta el final de la cuenca, ponderada (LONG)*: mayor prioridad a mayor longitud ponderada. Este criterio es una medida del grado de afectación del cuerpo de agua receptor y de su capacidad de asimilación de la contaminación. Se ha estimado la longitud total real de tramos contaminados en la cuenca correspondiente. La longitud ponderada es la longitud asociada al municipio multiplicada por el cociente entre la longitud total real y la suma de longitudes individuales de los municipios que generan tramos contaminados en la cuenca.

7) *Concentración de coliformes a la llegada a otro tramo contaminado (COLI)*: a mayor concentración mayor prioridad. Este criterio es una medida de la dilución del caudal de aguas residuales en el cuerpo de agua receptor.

Las variables anteriores se agruparon en tres grupos de criterios diferentes de priorización:

- Ambientales y de salud pública (POB, LONG y COLI)
- Demanda financiera (NBI y POB)
- Infraestructura en servicios públicos (ACU, ALC y PTAP)

Las primeras cinco variables se obtuvieron de diferentes entidades gubernamentales (SIAS, DANE, SSPD, CARS, FNR, etc.); la proyección de población se realizó con base en la información suministrada por el DANE. Las variables ambientales fueron generadas por el modelo explicado en el capítulo anterior. Para la priorización se aplicó el método de los promedios ponderados, aplicando factores de ponderación a los parámetros asociados con cada municipio. El peso otorgado a cada parámetro depende del criterio del analista. En el estudio se aplicaron diversos conjuntos de factores de ponderación, con el fin de determinar la sensibilidad de la priorización a los criterios que pudieran utilizar diferentes analistas. Las variables fueron normalizadas utilizando sus fun-

ciones de distribución, con el fin de conseguir una mejor discriminación en la información.

Debido a que las variables seleccionadas para la priorización municipal pueden tener algún grado de correlación (por ejemplo, el NBI con la cobertura de alcantarillado), se desarrollaron análisis multivariados usando el programa estadístico STATGRAPHICS con las variables de priorización. Con el mismo programa, se realizó un análisis de componentes principales, cuyo propósito es generar un conjunto menor de variables, generadas por combinación lineal de las variables originales, las cuales contengan la misma cantidad de información sin tener la correlación de las variables originales. A partir del análisis de componentes principales, es posible asociar a cada una de las variables un peso que depende de la información y no de los criterios del analista. Esta combinación de pesos fue definida como W_0 .

A partir de W_0 , se generaron ocho diferentes combinaciones de pesos para estudiar la sensibilidad de los resultados de la priorización a los criterios del decisor. También se realizó una priorización considerando el tipo de cuerpo receptor de Aguas Residuales de los municipios. Dentro del modelo de la red hídrica nacional no se manejan cuerpos receptores diferentes a ríos. En este análisis los municipios que descargan sus AR en lagos, lagunas, represas, etc., tienen una mayor importancia en la priorización.

Finalmente se generó un listado con los resultados de la ponderación, con los municipios más importantes en cuanto a inversión en PTAR.

2.1. RESULTADOS

Se generaron 4 listas de priorización. La primera sólo considera criterios Ambientales y de Salud Pública. La segunda involucra adicionalmente el tipo de cuerpo receptor de los municipios. La tercera involucra todos los criterios de priorización y la cuarta considerando el tipo del cuerpo receptor. El mismo método fue utilizado para priorizar las cuencas contaminadas, identificadas en la modelación.

El resultado final del estudio fue un listado de todos los municipios del país, con índices de prioridad individuales y para la cuenca a la que pertenece. Este listado fue utilizado posteriormente para estimar los costos de inversión, y verificar la disponibilidad de recursos para el desarrollo del plan nacional de manejo de aguas residuales a 10 años.

Como resultado de la presentación y discusión del informe preliminar, se convino realizar una comparación de los municipios priorizados solamente con criterios ambientales y sin tener en cuenta las plantas de aguas residuales existentes, con los municipios aptos para saneamiento según el Ministerio de Desarrollo (389). El resultado de este análisis son tres listados de municipios en las siguientes categorías:

- Municipios en ambas listas (145).
- Municipios prioritarios según criterios ambientales no considerados aptos por el Ministerio de Desarrollo (244).
- Municipios Considerados aptos por el Ministerio de Desarrollo pero no prioritarios según criterios ambientales (244).

3. ANÁLISIS FINANCIERO

3.1. NECESIDADES DE INVERSIÓN

Con el fin de determinar las necesidades de inversión del Plan Decenal de Aguas Residuales se planteó inicialmente utilizar dos enfoques: el enfoque basado en la estimación de funciones de costos de inversión y el enfoque de valores promedios de costos de inversión a nivel de prediseño de plantas de tratamiento reportados para diferentes municipios del país durante varios años.

Para el enfoque de estimación de costos de inversión se depuró la información utilizada en el estudio de Hidrotec y se recopiló información nuevamente proveniente de la CVC. En total se dispuso de 129 datos de plantas de tratamiento distribuidos por tecnología (filtros, lagunas, lodos y uasb) y por tamaños de población (se establecieron 8 rangos). La población del municipio fue la variable que

mostró relevancia, y la forma lineal fue la que dio el mejor ajuste. Las curvas de costos de inversión muestran que lagunas es la tecnología menos costosa para poblaciones menores a 30.000 habitantes. Para poblaciones entre superiores a los 30.000 habitantes las tecnologías menos costosas son uasb y lodos activados.

Aunque los modelos arrojan resultados estadísticos relativamente buenos y con los signos esperados, no se consideró conveniente utilizar las funciones de costos para determinar las necesidades de inversión debido a la poca disponibilidad de datos, especialmente para municipios grandes, por esta razón se decidió utilizar el enfoque de costos de inversión promedio reportados por Hidrotec, Ministerio del Medio Ambiente y los obtenidos en el presente estudio. Las necesidades de inversión del plan son de alrededor de US \$476 millones de dólares del 2001.

3.2. FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Se identificaron primero las posibles fuentes de financiamiento para el Plan, teniendo en cuenta principalmente estudios anteriores. Para cada fuente de financiamiento se establecieron una serie de supuestos con el fin de recalcular o calcular los montos probables con los cuales se podrían disponer. El monto total estimado para financiar las necesidades del Plan fue de cerca de US \$409 millones de dólares del 2001, distribuidos aproximadamente en US \$56 millones provenientes por tasas retributivas; US \$250 millones por otras rentas de las Cars (sobre tasa del predial más transferencias del sector eléctrico); US \$ 69 millones del Fondo Nacional de Regalías; US \$28 millones a través de los recursos con que

cuentas los entes territoriales y US \$6 millones de crédito externo, tal como se observa en la tabla.

ALGUNAS FUENTES DE RECURSOS PARA EL PLAN DECENAL DE AGUAS RESIDUALES

A través de estas posibles fuentes de financiamiento se estaría cubriendo cerca del 86% de las necesidades de inversión del Plan. Para cubrir el resto de las necesidades del Plan se deben explorar otras fuentes de financiamiento, principalmente tarifas, pero considerando que la inclusión de los costos de inversión de las plantas no implica una pérdida considerable del bienestar de los usuarios. Igualmente, se recomienda trabajar bajo el enfoque regional con el fin de aunar esfuerzos para hacer más fácil la consecución de recursos y la utilización eficiente de los mismos.

4. GESTIÓN INSTITUCIONAL

Las entidades públicas involucradas en la gestión del sector de aguas residuales pertenecen a tres tipos de niveles: Nacional, Regional y Local. A nivel nacional, las entidades responsables de la gestión en el tema de aguas residuales son el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el Ministerio de Desarrollo Económico (MDE), el Ministerio de Salud Pública (MSP) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP). Dos entidades adicionales de carácter nacional son responsables de la gestión en el tema de aguas residuales: la Comisión de Regulación de Agua Potable (CRA), adscrita al Ministerio de Desarrollo Económico, y la Superintendencia de Servicios Públicos (SSP), adscrita al DNP.

A nivel regional distintas entidades son importantes en la gestión en aguas residuales. Se destacan las

FUENTES	VALOR ANUAL (\$ DEL 2001)	VALOR ANUAL (US\$ DEL 2001)	VALOR DECENAL (US\$ DEL 2001)
Tasas Retributivas	12.301.568.277	5.591.622	55.916.219
Otras Rentas CARS (*)	55.000.000.000	25.000.000	250.000.000
Fondo Nacional de Regalías	15.000.000.000	6.818.182	68.181.818
Recursos Entes Territoriales	6.235.000.000	2.834.091	28.340.909
Crédito Externo			6.000.000
TOTAL	88.536.568.277	40.243.895	408.438.947

(*) Sobretasa del predial más transferencias del sector eléctrico.

Corporaciones Autónomas Regionales y los Departamentos (Gobernaciones). A nivel local, la entidad pública más importante en la gestión de aguas residuales es el municipio. La Ley 142/94 establece que es el principal responsable de la gestión en aguas residuales a nivel local y está encargado de garantizar la prestación del servicio.

La propuesta para la coordinación de las entidades a nivel nacional, pretende compatibilizar e integrar los objetivos de estas entidades. La metodología para ello consiste en seleccionar unas cuencas/municipios críticos según criterios ambientales y de salud pública. Una vez establecidas estas cuencas/municipios críticos, estos deberán convertirse en la primera prioridad de las entidades encargadas del sector de saneamiento básico del país, para el desarrollo de todas infraestructura necesaria que lleve a la construcción de la PTAR. Para tal fin, se propone utilizar la metodología establecida por el Ministerio de Desarrollo Económico en el RAS/2000 donde, teniendo en cuenta consideraciones como la cobertura de otros servicios públicos y la capacidad financiera e institucional de municipio, podrá priorizarse y dar viabilidad a los proyectos de planta de tratamiento ubicadas en los municipios críticos y/o cuencas críticas. Para solucionar la divergencia entre los criterios de priorización de los Ministerios acerca de la capacidad económica de los usuarios, deberá aplicarse una salvedad contemplada en el RAS, que permite que el proyecto adopte un nivel de complejidad más alto, lo que reduce los requerimientos sobre la cobertura de otros servicios públicos, y facilita la aprobación de la construcción de la planta. Esta metodología propuesta permite que los tres Ministerios (Medio Ambiente, Desarrollo Económico y Salud Pública) cumplan de manera simultánea sus objetivos en el proceso de priorización de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

Chapra, S.C. 1997.

Surface Water Quality Modeling.
New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Díaz-Granados, M., S. Barrera, J.P. Ramos, L.A. Camacho, R. Rosales, N. Escalante y M. Torres. 2002.

“Metodología Multicriterio para la Priorización de Inversión en Aguas Residuales Municipales en Colombia.”

Ponencia presentada al XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Mayo 2002.

Fair, G.M., J.C. Geyer y D.A. Okun. 1971.

Elements of Water Supply and Wastewater Disposal.

New York: John Wiley and Sons, Inc.

Gameson, A.L.H. y K.G. Robertson. 1955.

“*The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea Water*”, *J. Appl. Chem*, vol. 5, pp. 502.

Leopold, L.B., M.G. Wolman y J.P. Miller. 1964.

“*Fluvial Processes in Geomorphology*”

San Francisco: Freeman.

RAS - Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

Unianides, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. 2001.

Modelación de la Calidad del Agua del Río Bogotá – EAAB.

Bogotá D.C.

Unianides, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. 2002.

Aplicación de un Modelo Numérico para la Priorización de la Gestión de Aguas Residuales Domésticas en Colombia.

Bogotá D.C.

Vélez, J., G. Poveda y O. Mesa. 2000.

“*Balances Hidrológicos de Colombia*”,

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colciencias, Unidad de Planeación Minero-energética, UPME, Medellín.