
EL ANALISIS DE COSTO MINIMO EN PROYECTOS DE SANEAMIENTO AMBIENTAL

Ramón Duque Muñoz
Profesor Titular Departamento de Procesos Químicos y Biológicos
Universidad del Valle

RESUMEN

En este artículo se hace una presentación general del análisis de costo mínimo y de la metodología de evaluación de proyectos de agua potable y saneamiento ambiental utilizada por los organismos de planificación y

financiación de obras en el país. Con base en ella se plantean algunas observaciones y se desarrolla una discusión de la metodología, que puede conducir a mejorarla. 

LA CAUSA

Tantas veces oí la exigencia de presentarme con el "costo mínimo" como acompañante de cada proyecto presentado por el Ministerio de Salud al Departamento Nacional de Planeación, DNP, dentro del Programa de Cofinanciación para el Mejoramiento de los Sistemas Municipales de Agua Potable y Saneamiento Ambiental, que terminé tomándole confianza y simpatizando con él.

Era como una especie de monstruo que, por no tenerlo de mi lado, me amenazaba constantemente pero sin llegar a concretar su gesto. Si a duras penas contaba con el costo del proyecto, qué diablos sabría yo de su "costo mínimo"; esto él lo tenía claro y por dicha razón me permitía ciertas libertades para evadirlo.

En realidad ya conocía, pero de lejos, al "costo mínimo". Me lo habían presentado más o menos unos dos años atrás, pero en aquella ocasión, aun cuando me pareció interesante, no le presté mayor atención.

Ahora era como una llave mágica con la cual podía abrir puertas que conducían a alguna parte, no sabía a donde, pero las abría.

Pero así como el ocio es la madre de todos los vicios, cosa que algunos bendicen y otros maldicen, así la necesidad es la madre de todos los artes y saberes y por eso también la bendicen y maldicen.

De ahí que cuando los señores del Programa de Asis-

tencia Técnica del Sector, AT/PAS, gentilmente me invitaran a un seminario sobre el tema, en donde el señor "costo mínimo" se presentaría, puse toda la atención que pude a la parte de su materia. Luego leí algunos documentos y pude enterarme con cierto detalle acerca de su vida y milagros.

Ahora escribo a mi simpatizado anotando algunas observaciones acerca de su comportamiento, esperando que lo mejore y que con esto "costo mínimo" termine simpatizando conmigo.

LA VERSION OFICIAL

La forma tradicional de plantear y analizar un proyecto, en el Sector de Agua Potable y Saneamiento Ambiental, tiene su base en la definición de un "período de diseño", tiempo sobre el cual se define el tamaño de las instalaciones y demás componentes de un sistema. Este "período de diseño" se decide tomando en consideración factores locales como recursos disponibles, tamaño de la población y tasa de crecimiento, consideraciones políticas y variables técnicas como normas, duración de materiales y otros.

Alrededor de este tiempo se definen alternativas, se evalúan, se seleccionan y en ocasiones se hacen subalternativas de ejecución de aquella finalmente seleccionada.

Esta metodología puede ser válida bajo ciertas condiciones socioeconómicas pero en un esquema de recursos escasos es muy poco ventajosa.

El costo mínimo intenta analizar el problema desde el punto de vista de la racionalidad económica: los recursos sociales deben ser asignados de tal forma que conduzcan a la maximización de los objetivos establecidos también socialmente.

Se acepta así que una inversión es factible cuando los beneficios económicos obtenidos son mayores que los correspondientes costos económicos; como estos factores ocurren en el tiempo, se valoran a valor presente (VP), a una tasa de descuento (r) que corresponde a la tasa social.

Se puede calcular así el valor presente neto como

$$VPN = \sum VP(\text{beneficios sociales}) - \sum VP(\text{costos sociales})$$

y lógicamente una inversión será factible cuando

$$VPN \geq 0$$

Sin embargo, se acepta que los beneficios de las inversiones en agua potable y saneamiento son difíciles de identificar y de medir. Por esa razón, bajo el supuesto que para beneficios iguales existen diferentes alternativas, la mejor será aquella que tenga el menor costo económico. En otras palabras, se define "a priori" que los beneficios obtenidos serán todos iguales y mayores que los costos.

La valoración de costos se hace sobre la base de calcular, para cada alternativa:

$$VP_{\text{costos}} = \sum_i \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

donde

r = tasa de descuento social

i = tiempo en que se hace efectivo el costo C_i

C_i = tamaño del costo que se hace al momento i

Generalmente al evaluar el proyecto no se tiene acción sobre el factor r puesto que éste está determinado por una decisión política de la región o del país. Pero en cambio se pueden definir en qué momento y de qué magnitud se hace el costo.

Todos los esfuerzos se dirigen a tratar de minimizar los costos totales, que incluyen tanto la inversión en el proyecto como su operación y mantenimiento y los reemplazos que sean necesarios.

En el caso de los costos de inversión, el tamaño de las instalaciones se relaciona a menudo con el costo mediante una expresión del tipo

$$C = kQ^a$$

donde

C = costo de la instalación de tamaño Q

k = constante, equivalente al costo de la instalación unitaria

Q = tamaño de la instalación, medido en unidades apropiadas ($m^3/\text{día}$; m^3 ; m^2 ...)

a = constante, equivalente a la flexibilidad que tiene la estructura de variar su costo en la medida de la variación de su tamaño

Esta relación se determina calculando o tomando datos sobre los costos correspondientes a diferentes tamaños y realizando una regresión alrededor de estos datos.

Para el caso de agua potable, la variable independiente

puede expresarse como Q en litros por segundos o en metros cúbicos por día, aun cuando lógicamente son posibles otras variables.

k sería el costo de una instalación de tamaño 1, mientras que el valor de a define qué tan sensible es el costo a la variación del tamaño. Así, cuando $a = 0$ el costo es independiente de Q , como sería el caso de un túnel cuyo costo dentro de cierto intervalo de tamaño, no depende de la cantidad de agua sino de las especificaciones mínimas de construcción. Cuando $a=1$, se tendría el caso en donde el costo es proporcional a Q . Pero si $0 < a < 1$, se tendrá la condición en donde a un aumento porcentual del tamaño, corresponde un menor aumento porcentual de los costos. El caso contrario ocurre cuando $a > 1$ (GRAFICO 1).

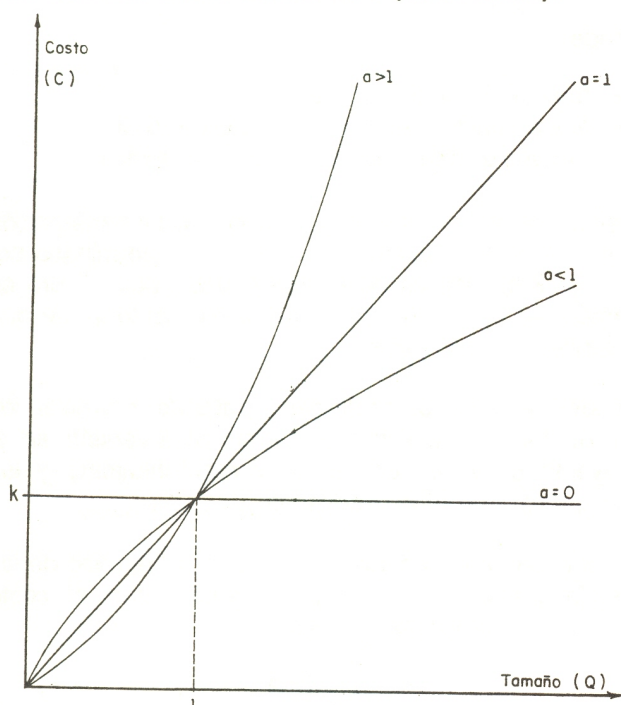


GRAFICO 1. Relaciones entre costo y tamaño, de la forma $C = kQ^a$, para diferentes valores de a .

Generalmente, las inversiones en agua potable y saneamiento ambiental están dentro de la categoría $0 < a < 1$. En estas condiciones es ventajoso tratar de construir la instalación tan grande como sea posible para aprovechar lo que se denomina "economía de escala". Así, si a es pequeño, un incremento grande en el tamaño implica un incremento pequeño en el costo. A medida que a crece, esta relación se va perdiendo, pero de todas maneras el aumento porcentual del costo es menor que el correspondiente aumento de tamaño.

Pero de otra parte el hacer instalaciones más grandes que lo necesario implica tener capacidad ociosa algún tiempo o sea perder oportunidad con los recursos inver-

tidos, lo que se llama "lucro cesante". Esta contradicción se resuelve encontrando un punto en donde el balance de la economía de escala y del lucro cesante conduzca al costo mínimo, lo cual evidentemente define un tamaño óptimo de la instalación y por ende el momento de la inversión.

Este punto se encuentra analizando las diferentes alternativas del tamaño. Así por ejemplo, para una demanda de agua creciente pero lineal y con una demanda inicial 0, se podrían definir diferentes alternativas de inversión en el tiempo. El cruce demanda-tiempo define el tamaño (GRAFICO 2).

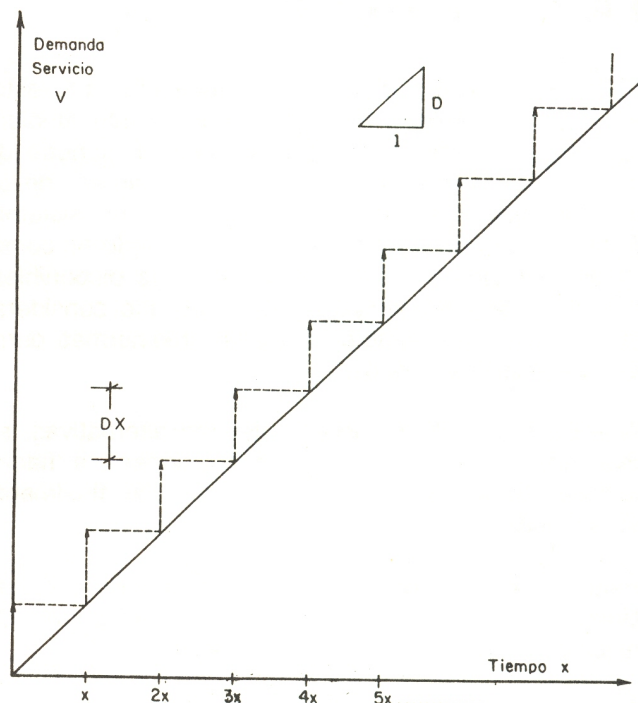


GRAFICO 2. Esquema de inversiones para una demanda lineal, creciente

Ahora a un tiempo 0 se puede construir una instalación que atienda la demanda satisfactoriamente hasta un tiempo x , en donde se repetiría la inversión y así sucesivamente.

El valor de cada inversión sería

$$C = kQ^a = k(Dx)^a$$

y el valor presente de esta alternativa sería

$$VP = k(Dx)^a \left\{ 1 + \frac{1}{(1+r)^x} + \frac{1}{(1+r)^{2x}} + \dots + \frac{1}{(1+r)^{nx}} + \dots \right\}$$

la cual, con $rx \rightarrow \infty$ conduce a

$$VP = k(Dx)^a \frac{e^{rx}}{e^{rx} - 1}$$

Dado que se quiera minimizar este costo en valor presente es necesario encontrar el valor de x en donde se encuentre que $dVP/dx = 0$

$$\frac{dVP}{dx} = 0 = \frac{d}{dx} k(Dx)^a \frac{e^{rx}}{e^{rx} - 1}$$

que produce una solución del tipo

$$x^* = \frac{a}{r} (e^{rx^*} - 1)$$

ecuación que puede resolverse por métodos numéricos.

El período óptimo de diseño x^* , que produce los costos mínimos, depende en este caso -en donde solo se toman en cuenta los costos de inversión bajo la presunción que los costos de operación y mantenimiento son todos iguales y que por tanto no intervienen en la decisión- de a y de r , haciendo que entre mayor sea a , menor será x^* , y entre menor sea r , aumentará el valor de x^* .

Es decir, entre menos se pueda aprovechar la economía de escala y más "caros" sean socialmente los recursos, más pesará el factor de lucro cesante y x^* deberá ser pequeño (GRAFICO 3).

Es evidente que se pueden estudiar otras situaciones y llegar a conclusiones acordes. Así, se puede plantear el caso cuando la demanda no es uniformemente creciente o cuando la demanda inicial tiene un valor definido, o sea que existe una demanda represada.

Aún cuando x^* no depende sino de a y de r , VP depende de k , a , r , y D . Esto hace evidente una línea de creación de tecnología, estudio e investigación alrededor de los valores de a y de k y de una política fuerte de tipo institucional alrededor de la demanda.

Sobre la base de estos principios, las entidades financieras del sector (FINDETER S.A., Ministerio de Hacienda) establecen una metodología para el dimensionamiento óptimo que implica los siguientes pasos:

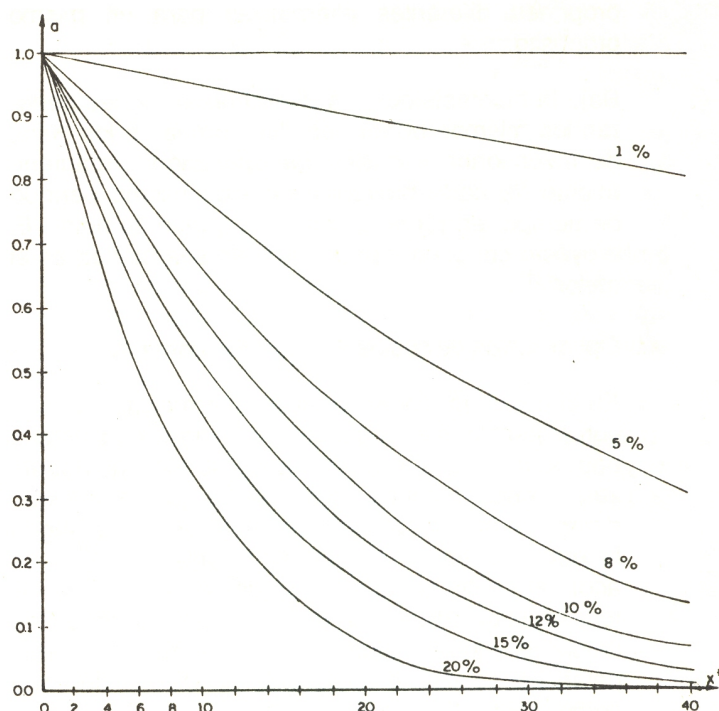


GRAFICO 3. Valores de tiempo óptimo de Inversión (x^*) para diferentes valores de a y de r

1. Proyecciones de la demanda

Este factor, fundamental en la determinación del tamaño de las obras, se analiza en función de:

- Consumos actuales
- Demografía
- Definición de dotaciones
- Proyecciones de consumos
- Adopción de factores pico para consumos

2. Identificación de la demanda insatisfecha

En esta etapa se definen los estados y capacidades de cada una de las componentes del sistema actual. Esta definición conducirá a plantear una alternativa básica cual es sencillamente la de mejorar en lo posible lo actual para llevarlo lo más rápido y económico posible a su máxima capacidad. De ahí en adelante se definirían, para cada componente, los tamaños de las adiciones tomando como guías las alternativas de ampliación seleccionadas y la minimización de costos.

3. Análisis técnico-económico de alternativas

Este es un punto importante para plantear luego la observación a esta metodología. En este paso se

proponen diferentes alternativas para un mismo propósito.

Bajo la hipótesis que las diferentes opciones generan los mismos beneficios, "se comparan los flujos de inversiones y gastos de operación y mantenimiento de cada proyecto, para un mismo período de tiempo, en términos del valor presente neto. El proyecto cuyo valor presente neto sea menor, es el mejor" (1).

4. Optimización de costos de cada componente

En el paso anterior se evalúan alternativas que son completamente excluyentes (v.g. gravedad versus bombeo). Ahora, en este paso, "se trata de optimizar, a nivel de cada componente que lo amerite, dentro de la o las alternativas seleccionadas según la etapa anterior, el plan de inversiones" (2). Es aquí, en este punto, en donde se minimizan las funciones de costo y se definen los tamaños de las unidades que componen el sistema; en otras palabras, se define el período de diseño de cada componente. Finalmente,

5. Plan de obras e inversiones óptimas

Utilizando los resultados obtenidos en el paso 4, se adopta un plan de inversiones que debe conciliar otras variables como la capacidad de inversión de la localidad, o su agilidad administrativa o sus recursos financieros. Se obtiene así una especie de cronograma en donde se indican cada una de las componentes y el momento en que han de ser construidas.

LA OBSERVACION

Dejando de lado otros comentarios y refiriéndose solamente al aspecto procedimental, el esquema utilizado de primero escoger una alternativa global y luego intentar minimizar el costo de ella, tiene implícito un error que puede conducir a cometer equivocaciones tan graves como las que trata de evitar el uso del "costo mínimo".

Este error se hace aún más patente cuando se trata de evaluar alternativas para una misma componente del sistema, en donde se puede trabajar con funciones de costo bien definidas.

Metodológicamente no es posible asegurar que la selección de la mejor alternativa, tal como se plantea en el paso 3 "Análisis técnico-económico de alternativas", se mantenga aún al final, luego de minimizar sus costos, cuando se pasa al paso 4 "Optimización de costos de cada componente".

La cuestión principal es que las alternativas deben compararse con lo mejor de cada una de ellas, es decir, con el esquema que produce el costo mínimo en cada una.

La confusión nace de la utilización de un concepto que el "costo mínimo" intenta precisar: mientras que en el paso 3 se utiliza un horizonte de proyecto preconcebido (las alternativas se comparan "para un mismo período de tiempo"), en el paso 4 se intentan definir precisamente los períodos de diseño que conducen a una minimización del costo, sin tomar para algo en cuenta aquel "período de tiempo" a que es tan afecto el paso 3.

Para costos de operación y mantenimiento similares y con vidas útiles suficientemente amplios, las alternativas pondrán al descubierto el error cuando sus funciones de costo de inversión se crucen a un tiempo T_1 , mientras que se evalúan a un período mayor que T_1 produciendo una decisión contraria a la mostrada por sus valores presentes mínimos, que es el indicador real de evaluación.

Gráficamente, con funciones de costo $C = kQ^a$, la situación sería la que presenta el **GRAFICO 4**.

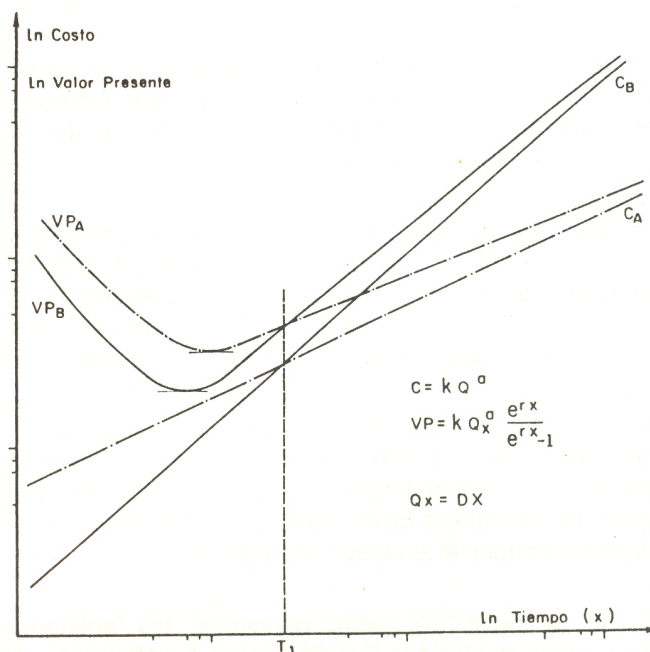


GRAFICO 4. Ilustración de la situación en donde no se mantienen las posiciones relativas

(1) Banco Central Hipotecario. Fondo Financiero de Desarrollo Urbano. División de Desarrollo Técnico. "Dimensionamiento Óptimo de Proyectos. Agua Potable y Alcantarillado". Documento Técnico. Noviembre, 1989.

(2) Banco Central Hipotecario. Ibid.

EL EJEMPLO

Sea un sistema de abastecimiento de agua que desea ampliar oportunamente un elemento definido, como puede ser la potabilización.

Se han considerado dos alternativas tecnológicas, A y B, que producen la misma protección contra el riesgo sanitario, con costos de operación y mantenimiento similares y con vidas útiles iguales.

Los costos de inversión, en millones de pesos, son:

$$C_A = 8.0 Q^{0.60} \quad \text{y}$$

$$C_B = 4.2 Q^{0.78}$$

con Q expresada en litros por segundo; a estas ecuaciones se ha llegado luego de un cuidadoso análisis económico y técnico.

El evaluador ha decidido utilizar un horizonte de proyecto de 24 años, con una demanda uniforme de 5 litros por segundo, por año. La tasa social de descuento ha sido determinada por el gobierno central en 12% anual.

Así, de acuerdo con la metodología tradicional, el evaluador calcula:

$$C_A = 8.0 (120)^{0.60} = \$ 141.45 \text{ millones}$$

$$C_B = 4.2 (120)^{0.78} = \$ 175.80 \text{ millones}$$

La evaluación de los costos de operación y mantenimiento a valor presente resulta favorable para la alternativa B, pero la diferencia no alcanza a compensar los \$ 34.35 millones de sobre costo en la inversión.

Por tanto, la decisión sería:

Seleccionar la alternativa A

Ahora el evaluador se dirige a "optimizar" su alternativa seleccionada. De acuerdo con el "costo mínimo" se encuentra que

$$x^* = 8 \text{ años}$$

y el valor presente de la inversión será

$$(VP)_A = 8.0 \left(\frac{120}{24} \times 8 \right)^{0.60} \times \frac{e^{0.96}}{e^{0.96} - 1}$$

$$= \$ 118.57 \text{ millones}$$

y llega a la feliz conclusión que, construyendo cada 8 años, se ahorra la módica suma de \$ 22.88 millones, suficientes para olvidar los menores costos de operación y mantenimiento de la alternativa B. Y todos tan contentos.

Pero retomando un poco la alternativa B antes de desterrarla, el evaluador llega, con la ayuda del buen señor "costo mínimo" a que el tiempo óptimo de ella es 4 años y

$$(VP)_B = 4.2 \left(\frac{120}{24} \times 4 \right)^{0.78} \times \frac{e^{0.48}}{e^{0.48} - 1}$$

$$= \$ 113.99 \text{ millones}$$

Sorpresa!

La alternativa B resulta mejor que la A!. Y si se le suman los costos de operación y mantenimiento tanto a la A como a la B, la balanza se inclina aún más hacia la B.

El evaluador debe aceptar que la decisión debería ser

Seleccionar la alternativa B

y que ésta es la más acorde con el "costo mínimo".

El **GRAFICO 5** sirve para aclarar la situación. La metodología oficial conduce al uso de un horizonte del proyecto en donde se produce una decisión basada sobre el costo total.

Pero el "costo mínimo" dice que éste no es el verdadero criterio, sino más bien el valor presente de construir con racionalidad económica. Así, para la alternativa A dice: construya cada 8 años, lo que implica un costo en

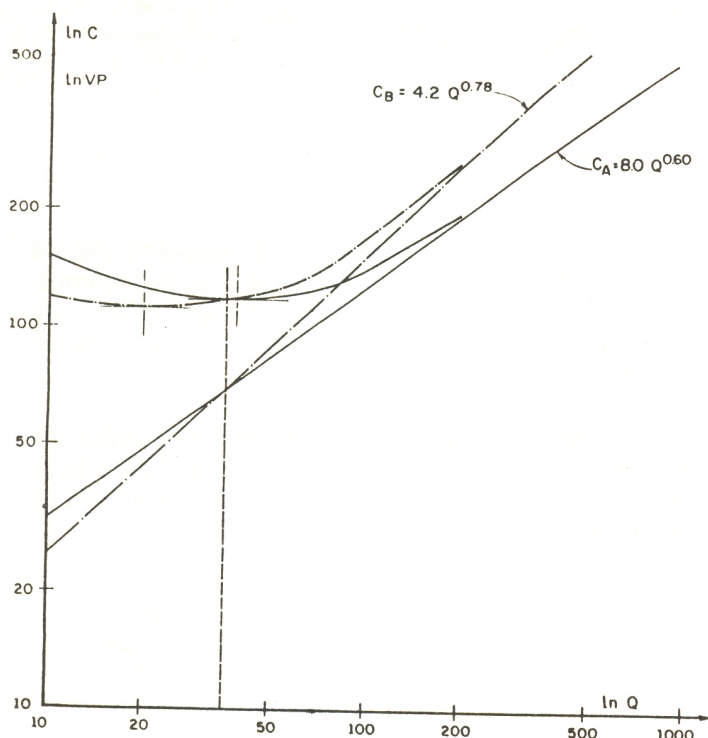


GRAFICO5. Situación ilustrativa del ejemplo planteado

valor presente de $(VP)_A$ y para la alternativa B: construya cada 4 años, con un resultado final de $(VP)_B$. Ahora compare $(VP)_A$ con $(VP)_B$ y decida. Y el "horizonte del proyecto"? El buen señor "costo mínimo" no lo requiere y por tanto que descanse en paz.

Aquí los señores amigos del "horizonte del proyecto" protestan y piden una evaluación real y objetiva. Bien: ella sería:

ALTERNATIVA A		0	8	16	24
Inversión		73.17	73.17	73.17	
Inversión en VP			73.17	29.55	11.94
Total...		\$ 114.66			

ALTERNATIVA B		0	4	8	12	16	20	24
Inversión		43.46	43.46	43.46	43.46	43.46	43.46	43.46
Inversión en VP			27.62	17.55	11.15	7.09	4.50	
Total...		\$ 111.37						

Y así, la B será mejor que la A, con "horizonte de proyecto" o sin él. Y lo será cualquiera sea el tamaño del horizonte. Por tanto, que vuelva y descanse en paz.

LA SUGESTION

Consiste sencillamente en eliminar el paso 3 de la metodología oficial, quedando ella así:

Paso 1. Proyecciones de la demanda de agua

Paso 2. Identificación de la demanda insatisfecha

Paso 3. Identificación de alternativas

Paso 4. Cálculo de los costos económicos mínimos para cada alternativa

Paso 5. Selección, sobre la base anterior, del proyecto de costo mínimo, o plan de obras mínimo

EL FINAL

Aun cuando la observación hecha se refiere únicamente a la metodología, es claro que al señor "costo mínimo" se le pueden hacer otras anotaciones. Algunas podrán ser:

- Su presunción de los beneficios iguales, a donde llega por la dificultad reconocida de medir los beneficios de cada alternativa.
- El cierto desdén con que trata a los costos de operación y mantenimiento.
- Su olvido de los costos de reposición, o su presunción que las cosas son eternas.

Estos temas serán objeto de un trabajo posterior que permita diseñar y ejecutar un seminario de divulgación entre estudiantes de pregrado y postgrado no solo de Ingeniería, sino de Economía y Administración.

Mientras tanto, es de esperar que el señor costo mínimo tome a bien estas observaciones que solo son hechas con el ánimo de mejorar su contribución a la mejor inversión en Saneamiento Ambiental de nuestro país. 🍏

BIBLIOGRAFIA

1. **BANCO CENTRAL HIPOTECARIO. FONDO FINANCIERO DE DESARROLLO URBANO. DIVISION DE DESARROLLO TECNICO.** "Dimensionamiento Optimo de Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado". Departamento Técnico. Noviembre, 1989.
2. **BELDA, Enrique; DE TROCONIS, Antonio F.** *Análisis algebraico*. 2 ed. Talleres Gráficos Ordorica. Bilbao, España.
3. **PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.** *Formulación de Proyectos de Agua Potable. Costo mínimo*. Santafé de Bogotá, Julio, 1991.
4. _____. *Seminario sobre Preparación de Proyectos financiados por Findeter y Fonade*. Oscar Alvarado. "Proceso para preparar proyectos. Caso Agua Potable y Alcantarillado". Santafé de Bogotá, Septiembre, 1991.
5. **YEPES, Guillermo.** *Análisis de Costo Mínimo, Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Unidad Urbana y Agua Potable, Departamento Técnico Oficina Regional de América Latina y el Caribe, Banco Mundial, 1988.