

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.402>

Optimización del rendimiento económico marginal en proyectos de saneamiento modular mediante funciones multivariantes

Ing. Pablo Soto Ortega; MAP

psoto@esph-sa.com<https://orcid.org/0000-0003-3076-1241>Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica
Costa Rica

RESUMEN

El presente estudio desarrolla una metodología técnico-financiera para la priorización económica de módulos constructivos en un proyecto de saneamiento, orientada a maximizar el rendimiento económico y optimizar la recuperación de la inversión. La propuesta se fundamenta en el concepto de beneficio marginal aplicado a sistemas modulares, utilizando un enfoque de funciones multivariantes que integra variables clave como caudal, densidad de usuarios e inversión. Se introduce un parámetro compuesto (C) que representa el rendimiento económico potencial de cada módulo, definido como la relación entre el aporte hidráulico, la densidad poblacional y el costo de inversión. La metodología establece un proceso iterativo de optimización progresiva, en el cual los módulos se priorizan según su incremento marginal relativo ($\Delta C/C$), evaluando su contribución incremental al sistema conforme se integran nuevas unidades constructivas. El modelo incorpora el efecto de economías de escala mediante la distribución proporcional de los costos de interconexión, permitiendo una evaluación más realista del beneficio económico conjunto. Asimismo, se reconoce la mayor sensibilidad del rendimiento frente a variaciones en la inversión, penalizando soluciones de alto costo relativo. Como resultado, se obtiene un orden óptimo de ejecución que prioriza las inversiones con mayor retorno económico temprano, mejora el perfil de repago del financiamiento y garantiza coherencia técnica en la expansión del sistema de saneamiento. La metodología proporciona además trazabilidad, transparencia y soporte técnico para la toma de decisiones estratégicas en proyectos de infraestructura sanitaria.

Palabras Claves: optimización económica, sistemas de saneamiento, beneficio marginal, inversión en infraestructura, modelos multivariantes



Optimization of Marginal Economic Performance in Modular Sanitation Projects Using Multivariable Functions

ABSTRACT

This study develops a technical-financial methodology for the economic prioritization of construction modules in a sanitation project, aimed at maximizing economic performance and optimizing investment recovery. The proposal is based on the concept of marginal benefit applied to modular systems, using a multivariable function approach that integrates key variables such as flow rate, user density, and investment. A composite parameter (C) is introduced that represents the potential economic performance of each module, defined as the ratio between hydraulic contribution, population density, and investment cost. The methodology establishes an iterative process of progressive optimization, in which modules are prioritized according to their relative marginal increase ($\Delta C/C$), evaluating their incremental contribution to the system as new construction units are integrated. The model incorporates the effect of economies of scale through the proportional distribution of interconnection costs, allowing for a more realistic evaluation of the overall economic benefit. Furthermore, it recognizes the greater sensitivity of performance to variations in investment, penalizing solutions with a high relative cost. As a result, an optimal execution sequence is obtained that prioritizes investments with the highest early economic return, improves the repayment profile of the financing, and ensures technical consistency in the expansion of the sanitation system. The methodology also provides traceability, transparency, and technical support for strategic decision-making in sanitation infrastructure projects.

Keywords: economic optimization, sanitation systems, marginal benefit, infrastructure investment, multivariate models



INTRODUCCIÓN

Las empresas de servicios públicos enfrentan importantes desafíos financieros cuando las inversiones en infraestructura no se traducen en generación inmediata de ingresos, lo que dificulta el cumplimiento de sus obligaciones de deuda y compromete la sostenibilidad de los proyectos. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar enfoques que permitan estructurar la ejecución de obras bajo esquemas modulares, en los cuales la incorporación progresiva de redes genere flujos de ingresos tempranos y contribuya a mejorar el perfil financiero del proyecto.

El presente estudio propone y formaliza una metodología de priorización económica para módulos constructivos de redes de saneamiento, orientada a optimizar la secuencia de ejecución en función de su rentabilidad y facilidad de implementación. La metodología tiene como objetivos principales maximizar la facturación temprana, reducir el riesgo financiero, optimizar la asignación de recursos y proporcionar un marco transparente y trazable que respalde la toma de decisiones ante actores técnicos, financieros e institucionales.

El modelo se fundamenta en un esquema de optimización progresiva, conceptualmente análogo a la productividad marginal del capital en economía y al principio del beneficio marginal en ingeniería económica. En este enfoque, se define un parámetro compuesto C que representa el beneficio económico relativo de cada módulo constructivo, expresado como una función del caudal aportado, la densidad de usuarios y la inversión requerida. Asimismo, se introduce el incremento marginal relativo $\Delta C/C$, el cual permite evaluar el impacto incremental de incorporar un nuevo módulo sobre el sistema previamente priorizado.

La metodología plantea un proceso iterativo de selección, en el cual se incorpora en cada etapa el módulo que maximiza el beneficio marginal relativo, actualizando progresivamente el conjunto de soluciones hasta determinar un orden óptimo de ejecución. Este procedimiento se sustenta en el análisis diferencial de una función multivariable que integra simultáneamente las variaciones relativas de caudal, densidad poblacional e inversión, permitiendo capturar la sensibilidad real del rendimiento económico ante cambios en estas variables.



En consecuencia, el enfoque propuesto permite establecer una estrategia de priorización que favorece la inversión temprana en aquellos componentes del sistema que generan mayor retorno económico, contribuyendo a una ejecución más eficiente, financieramente sostenible y técnicamente coherente de los proyectos de saneamiento.

A pesar de los avances en la planificación de infraestructura sanitaria, en la práctica persiste una limitación significativa: la ausencia de herramientas cuantitativas que permitan definir de manera objetiva el orden óptimo de ejecución de proyectos bajo restricciones financieras dinámicas. En muchos casos, la secuencia constructiva se determina con base en criterios técnicos o políticos, sin incorporar de forma explícita el impacto económico incremental de cada decisión sobre el sistema en expansión. Esta situación puede derivar en esquemas de inversión subóptimos, donde proyectos con alto potencial de retorno temprano son postergados, afectando la sostenibilidad financiera global. En este contexto, se hace necesario desarrollar metodologías que integren criterios económicos marginales dentro de un marco formal de optimización secuencial.

La presente investigación se delimita al análisis de sistemas de saneamiento en entornos urbanos consolidados o en vías de expansión, donde la infraestructura puede segmentarse en módulos independientes. El modelo se enfoca primordialmente en la optimización del CAPEX y la generación de ingresos tempranos, sin profundizar en las variables de mantenimiento a largo plazo (OPEX) o en restricciones topográficas extremas que obliguen a una secuencia constructiva única.

A diferencia de enfoques tradicionales, el presente estudio propone una formulación original basada en el análisis diferencial de una función multivariable, que permite evaluar explícitamente la contribución marginal relativa de cada módulo dentro de un sistema en expansión.

Marco teórico

Priorización de inversiones en infraestructura sanitaria

La planificación y ejecución de proyectos de infraestructura sanitaria, particularmente en sistemas de alcantarillado y saneamiento, se caracteriza por altos costos de inversión inicial, largos periodos de maduración y una dependencia directa de la incorporación progresiva de usuarios para la generación de ingresos (Briscoe & Garn, 1999; Loucks & van Beek, 2017). En este contexto, la definición del orden



de ejecución de los componentes del sistema constituye un factor crítico que incide tanto en la viabilidad técnica como en la sostenibilidad financiera del proyecto (Boardman et al., 2018).

Tradicionalmente, la priorización de inversiones en infraestructura sanitaria ha estado basada en criterios técnicos (cobertura, urgencia sanitaria, condiciones topográficas) o en evaluaciones costo-beneficio estáticas. Sin embargo, estos enfoques suelen presentar limitaciones al no considerar explícitamente la dinámica temporal de la generación de ingresos ni el efecto incremental de incorporar nuevas unidades constructivas sobre un sistema en expansión (Newnan et al., 2019). En consecuencia, existe una necesidad de metodologías que integren criterios económicos dinámicos con la lógica de expansión modular de redes.

Enfoques económicos basados en beneficio marginal

El concepto de beneficio marginal, ampliamente desarrollado en la teoría económica, establece que la toma de decisiones óptimas debe basarse en el análisis del aporte adicional que genera una unidad incremental de inversión o producción. En particular, la productividad marginal del capital ha sido utilizada como criterio para asignar recursos de manera eficiente, priorizando aquellas inversiones que generan mayor retorno relativo (Boardman et al., 2018)

En el ámbito de la ingeniería económica, este principio ha sido adaptado para evaluar alternativas de inversión mediante el análisis del beneficio incremental asociado a la incorporación de nuevas unidades o etapas de un proyecto (Newnan et al., 2019)

Este enfoque permite superar las limitaciones de evaluaciones agregadas, al centrarse en el efecto marginal de cada decisión dentro de un proceso secuencial.

No obstante, en aplicaciones tradicionales, el análisis marginal suele considerar variables de manera independiente o bajo supuestos simplificados, lo que limita su capacidad para capturar la interacción simultánea entre múltiples factores relevantes, como la demanda potencial, la densidad de usuarios y los costos de inversión en sistemas de infraestructura.

Modelos de optimización secuencial e incremental

Los problemas de priorización en proyectos modulares pueden ser abordados mediante enfoques de optimización secuencial, en los cuales las decisiones se toman de forma iterativa, incorporando en cada



etapa el elemento que maximiza un criterio de desempeño definido. Este tipo de estrategias es consistente con esquemas de decisión tipo *greedy*, donde se selecciona localmente la mejor alternativa con base en su contribución incremental al sistema (Loucks & van Beek, 2017)

En el contexto de redes de infraestructura, la optimización secuencial presenta ventajas significativas, ya que permite incorporar restricciones técnicas de conectividad, aprovechar economías de escala en infraestructura compartida y adaptar el proceso de ejecución a condiciones cambiantes (Briscoe & Garn, 1999).

Asimismo, estos enfoques permiten modelar explícitamente la interacción entre los componentes del sistema, reconociendo que el valor de cada unidad no es independiente, sino que depende del conjunto previamente construido.

Sin embargo, muchos modelos existentes simplifican la evaluación del beneficio incremental o no integran adecuadamente múltiples variables de decisión en una función de evaluación unificada, lo que limita su aplicabilidad en contextos complejos como los sistemas de saneamiento urbano (Hair et al., 2019).

Modelación costo-beneficio en sistemas de saneamiento

La evaluación económica de proyectos de saneamiento ha incorporado tradicionalmente variables como el caudal tratado, la población servida y los costos de inversión y operación. Estos elementos reflejan tanto la capacidad del sistema para generar ingresos (a través de la facturación del servicio) como la magnitud de los recursos requeridos para su implementación (Briscoe & Garn, 1999).

En particular, el caudal constituye un indicador directo del volumen potencialmente facturable, mientras que la densidad de usuarios refleja la concentración de demanda y la eficiencia en la utilización de la infraestructura instalada. Por su parte, la inversión requerida introduce una restricción fundamental, condicionando la viabilidad financiera del proyecto y afectando directamente el retorno esperado (Boardman et al., 2018).

A pesar de la relevancia de estas variables, los enfoques convencionales suelen integrarlas de manera estática o mediante indicadores agregados que no capturan su comportamiento relativo ni su impacto incremental en escenarios de expansión progresiva. Esto limita la capacidad de estos modelos para



orientar decisiones en contextos donde la secuencia de ejecución es determinante (Newnan et al., 2019)

Vacío metodológico y aporte del estudio

A partir de la revisión anterior, se identifica un vacío en la integración de enfoques económicos marginales, modelos de optimización secuencial y variables técnicas clave en una metodología unificada para la priorización de inversiones en sistemas de saneamiento (Loucks & van Beek, 2017).

En particular, existe una carencia de modelos que:

- Evalúen el beneficio económico de manera relativa e incremental,
- Integren simultáneamente variables hidráulicas, demográficas y de inversión,
- Consideren explícitamente el efecto de la interconexión y el uso compartido de infraestructura,
- Y permitan definir un orden óptimo de ejecución bajo un esquema iterativo y adaptable.

En respuesta a este vacío, el presente estudio propone una metodología basada en el análisis diferencial de una función multivariable que representa el beneficio económico del sistema. A través de la formulación de un parámetro compuesto y el cálculo de su incremento marginal relativo, se establece un criterio de priorización que permite seleccionar, en cada etapa, el módulo constructivo que maximiza el rendimiento económico incremental del conjunto.

Este enfoque contribuye a la literatura al introducir un marco analítico que combina principios de economía marginal, optimización progresiva y modelación multivariable, aplicado específicamente a la planificación de sistemas de saneamiento bajo esquemas de ejecución modular.

METODOLOGÍA

Definición del modelo y variables

Considérese un conjunto de módulos constructivos $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, cada uno caracterizado por:

- Q_i : caudal de diseño del módulo i
- ρ_i : densidad de usuarios asociada
- I_i : inversión requerida para su implementación (sin considerar interconexión)
- $I_{c,i}$: inversión requerida la interconexión del módulo i



- I_i^* : inversión requerida para su implementación (sin considerar interconexión inicial) $I_i^* = I_i + I_{c,i}$

Se define un parámetro compuesto C_i que representa el rendimiento económico relativo del módulo i , dado por:

$$C_i = \frac{Q_i}{I_i^*} * \frac{\rho_i}{I_i^*} = \frac{Q_i \cdot \rho_i}{I_i^{*2}} \quad (1)$$

donde:

- $\frac{Q_i}{I_i^*}$ es el caudal obtenido por cada unidad monetaria invertida (l/s/USD), y
- $\frac{\rho_i}{I_i^*}$ es la densidad de usuarios lograda por cada unidad monetaria invertida (usuarios/ km^2 /USD).

Este parámetro integra simultáneamente:

- el potencial de generación de ingresos (caudal),
- la concentración de demanda (densidad),
- y la eficiencia de inversión (penalizada cuadráticamente).

La formulación cuadrática de la inversión refleja la mayor sensibilidad del rendimiento económico frente a incrementos en el costo.

Evaluación del sistema agregado

Sea S_k el conjunto de módulos seleccionados en la iteración k . Se definen las variables agregadas:

$$Q(S_k) = \sum_{i \in S_k} Q_i, \rho(S_k) = \sum_{i \in S_k} \rho_i, I(S_k) = \sum_{i \in S_k} I_i \quad (2)$$

El rendimiento económico del sistema en la iteración k se define como:

$$C(S_k) = \frac{Q(S_k) \cdot \rho(S_k)}{I(S_k)^2} \quad (3)$$

Incremento marginal del rendimiento económico

El criterio de selección se basa en el incremento marginal relativo al incorporar un nuevo módulo $j \notin S_k$:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C(S_k \cup \{j\}) - C(S_k)}{C(S_k)} \quad (4)$$



Para analizar este incremento, se considera la función:

$$C = \frac{Q \cdot \rho}{I^2} \quad (5)$$

Aplicando diferenciación total:

$$\frac{dC}{C} = \frac{dQ}{Q} + \frac{d\rho}{\rho} - 2 \frac{dI}{I} \quad (6)$$

Para un modelo que integra una cantidad n de variables, donde la inversión se define como el denominador común y el resto de los factores representan beneficios por unidad de inversión, el parámetro C se generaliza de la siguiente manera:

$$C = \prod_{j=1}^{n-1} \frac{F_j}{I^n} \quad (7)$$

de tal forma que la diferencial total será:

$$\frac{dC}{C} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{dF_j}{F_j} - (n-1) \frac{dI}{I} \quad (8)$$

Las expresiones anteriores permiten generalizar el modelo a sistemas con múltiples variables de beneficio, extendiendo su aplicabilidad más allá del caso particular de tres factores y proporcionando un marco analítico flexible para diferentes configuraciones de infraestructura.

Esta expresión constituye el núcleo del modelo e indica que:

- el rendimiento aumenta con incrementos relativos en caudal y densidad,
- y disminuye con incrementos en la inversión, con un peso doble en el caso de dos factores, o n en el caso de n factores.

En forma discreta, para el caso de tres factores, el incremento relativo al agregar el módulo j se aproxima por:

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - 2 \frac{\Delta I}{I} \quad (9)$$

donde:

$$\Delta Q = Q_j, \Delta \rho = \rho_j, \Delta I = I_j + I_{c,j}$$

siendo $I_{c,j}$ el costo de interconexión asignado al módulo j .



Para el caso de n factores la expresión es:

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta F}{F} \right)_j - (n-1) \frac{\Delta I}{I} \quad (10)$$

Se trata de un criterio heurístico coherente con el gradiente local de la función.

Asignación de costos de interconexión

Dado que la infraestructura troncal es compartida, el costo de interconexión se distribuye proporcionalmente según la distancia de conexión d_i de cada módulo:

$$I_{c,i} = I_c \cdot \frac{d_i}{\sum_{k \in S} d_k} \quad (11)$$

donde:

- I_c : costo total del colector de interconexión,
- d_i : distancia de conexión del módulo i .

El costo total del módulo es entonces:

$$I_i^* = I_i + I_{c,i} \quad (12)$$

Regla de decisión

En cada iteración, se selecciona el módulo j que maximiza:

$$\frac{\Delta C}{C}$$

Esto equivale a elegir el módulo con mayor contribución marginal relativa al rendimiento económico del sistema.

Algoritmo de priorización

El procedimiento de priorización se implementa mediante el siguiente algoritmo iterativo:

Entrada: conjunto de módulos $\{1, 2, \dots, n\}$

1. Calcular C_i para cada módulo individual
2. Seleccionar el módulo inicial:

$$S_1 = \arg \max_i C_i \quad (12)$$

3. Para $k = 1$ hasta $n - 1$:



a. Para cada módulo $j \notin S_k$:

- Calcular $\Delta Q, \Delta \rho, \Delta I$
- Estimar $\frac{\Delta C}{C}$

b. Seleccionar:

$$j^* = \arg \max_j \left(\frac{\Delta C}{C} \right) \quad (13)$$

c. Actualizar:

$$S_{k+1} = S_k \cup \{j^*\} \quad (14)$$

Repetir hasta completar la secuencia de priorización.

El procedimiento se repite para $k = 1, \dots, n$, seleccionando en cada iteración el módulo $j \notin S_k$ que maximiza el incremento marginal relativo $\Delta C/C$.

La salida del algoritmo es la secuencia ordenada de módulos que define el orden óptimo de ejecución.

La aplicación práctica del modelo se ilustra mediante un ejemplo numérico hipotético, para tres factores (caudal, densidad e inversión) presentado en la Sección 6, el cual permite visualizar de forma explícita el proceso de selección incremental, el efecto del criterio de incremento marginal relativo ($\Delta C/C$) y la penalización asociada a inversiones de alto costo. Este ejemplo cumple además una función de validación conceptual del modelo propuesto.

Interpretación del modelo

El modelo propuesto establece un criterio de priorización basado en eficiencia marginal relativa, en el cual:

- Los módulos con alto aporte hidráulico y alta densidad poblacional son favorecidos.
- Las inversiones elevadas son penalizadas de forma no lineal.
- La incorporación de módulos considera su interacción con el sistema existente.
- Se aprovechan economías de escala mediante la compartición de infraestructura.

En consecuencia, la metodología permite identificar una secuencia de ejecución que maximiza el retorno económico temprano del proyecto, bajo un esquema dinámico y adaptativo.



Ejemplo numérico hipotético

Los siguientes ejemplos numéricos tienen como finalidad ilustrar el funcionamiento del modelo en un escenario controlado, destacando el efecto del criterio marginal relativo en la definición del orden óptimo de ejecución.

Se desarrollará tres factores: Caudal (l/s), Densidad (usuarios/km²) e Inversión (miles de USD).

Ejemplo 1: Tres módulos

Supongamos tres módulos de red de saneamiento:

Módulo	Caudal (Q_i) (l/s)	Densidad (ρ_i) (usuarios/km ²)	Inversión (I_i) (miles USD)	Distancia conexión (d_i) (m)
A	50	200	100	300
B	30	400	80	200
C	70	150	150	500

Costo total del colector de interconexión: $I_c = 90$ mil USD.

Cálculo de costo de interconexión.

Distribución proporcional según distancia:

$$I_{c,A} = 90 * \frac{300}{300 + 200 + 500} = 27$$

$$I_{c,B} = 90 * \frac{200}{1000} = 18$$

$$I_{c,C} = 90 * \frac{500}{1000} = 45$$

Costos totales:

$$I_A^* = 100 + 27 = 127$$

$$I_B^* = 80 + 18 = 98$$

$$I_C^* = 150 + 45 = 195$$

Rendimiento económico individual

$$C_i = \frac{Q_i * \rho_i}{(I_i^*)^2}$$

$$C_A = \frac{50 * 200}{127^2} = 0,62$$



$$C_B = \frac{30 * 400}{98^2} = 1,25$$

$$C_C = \frac{70 * 150}{195^2} = 0,28$$

El módulo B es el inicial porque maximiza C_i .

Iteración siguiente

Sistema inicial: $S_1 = \{B\}$.

Se evalúa el incremento marginal relativo al agregar A o C:

a. Caso al agregar A:

Incrementos:

$$\Delta Q = 50. \quad \Delta \rho = 200. \quad \Delta I = 127$$

Nuevo sistema: $S_2 = \{B, A\}$.

$$Q_{BA} = 30 + 50 = 80$$

$$\rho_{BA} = 400 + 200 = 600$$

$$I_{BA}^* = 98 + 127 = 225$$

Rendimiento:

$$C_{BA} = \frac{80 * 600}{225^2} \approx 0,95$$

Incremento relativo:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{BA} - C_B}{C_B} = \frac{0,95 - 1,25}{1,25} = -0,24$$

b. Caso al agregar C:

Incrementos:

$$\Delta Q = 70. \quad \Delta \rho = 150. \quad \Delta I = 195$$

Nuevo sistema: $S_2 = \{B, C\}$.

$$Q_{BC} = 30 + 70 = 100$$

$$\rho_{BC} = 400 + 150 = 550$$

$$I_{BC}^* = 98 + 195 = 293$$



Rendimiento

$$C_{BC} = \frac{100 * 550}{293^2} \approx 0,64$$

Incremento relativo:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{BC} - C_B}{C_B} = \frac{0,64 - 1,25}{1,25} = -0,49$$

Aunque en ambos casos el beneficio se reduce, al agregar A la reducción es menor que a agregar C, por lo que la red siguiente debe ser A en el orden B->A.

El mayor costo de inversión de C lo discrimina frente a A a pesar de tener un aporte de caudal mayor.

En consecuencia, el orden debe ser B->A->C, pero en todo caso, para fines de ejemplificación se calculará el rendimiento marginal al agregar C al $S_2 = \{B, A\}$.

Iteración siguiente

Sistema inicial: $S_{21} = \{B, A\}$.

Se evalúa el incremento marginal relativo al agregar C:

Incrementos:

$$\Delta Q = 70. \quad \Delta \rho = 150. \quad \Delta I = 195$$

$$Q_{BAC} = 80 + 70 = 150$$

$$\rho_{BAC} = 600 + 150 = 750$$

$$I_{BAC}^* = 225 + 195 = 420$$

Rendimiento:

$$C_{BAC} = \frac{150 * 750}{420^2} \approx 0,64$$

Incremento relativo:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{BAC} - C_{BA}}{C_{BA}} = \frac{0,64 - 0,95}{0,95} \approx -0,33$$

Resultado: El orden de priorización es B->A->C



Ejemplo 2: Sensibilidad al costo de inversión

Supóngase ahora que el módulo C recibe un subsidio o una reducción de costos de \$25 000, el costo de inversión para la empresa decrece de \$150 000 a \$125 000. Se trata de determinar si el modelo es sensible a ese cambio en el costo de inversión.

Siguiendo el mismo procedimiento del ejemplo anterior, se obtienen los siguientes resultados.

Características de los módulos

Módulo	Caudal (Q_i) (l/s)	Densidad (ρ_i) (usuarios/km ²)	Inversión (I_i) (miles USD)	Distancia conexión (d_i) (m)
A	50	200	100	300
B	30	400	80	200
C	70	150	125	500
Costo total de interconexión				90

Costo de interconexión, proporcional a la distancia:

$I_{C,A}$	$I_{C,B}$	$I_{C,C}$
27	18	45

Rendimiento económico individual:

C_A	C_B	C_C
0,62	1,25	0,36
B sigue siendo el módulo inicial		

Caso B+A

ΔQ	$\Delta \rho$	ΔI
50	200	127
Q_{BA}	ρ_{BA}	I_{BA}^*
80	600	225
C_{BA}	0,95	
Incremento relativo		$\Delta C/C$
		-0,24

Caso B+C

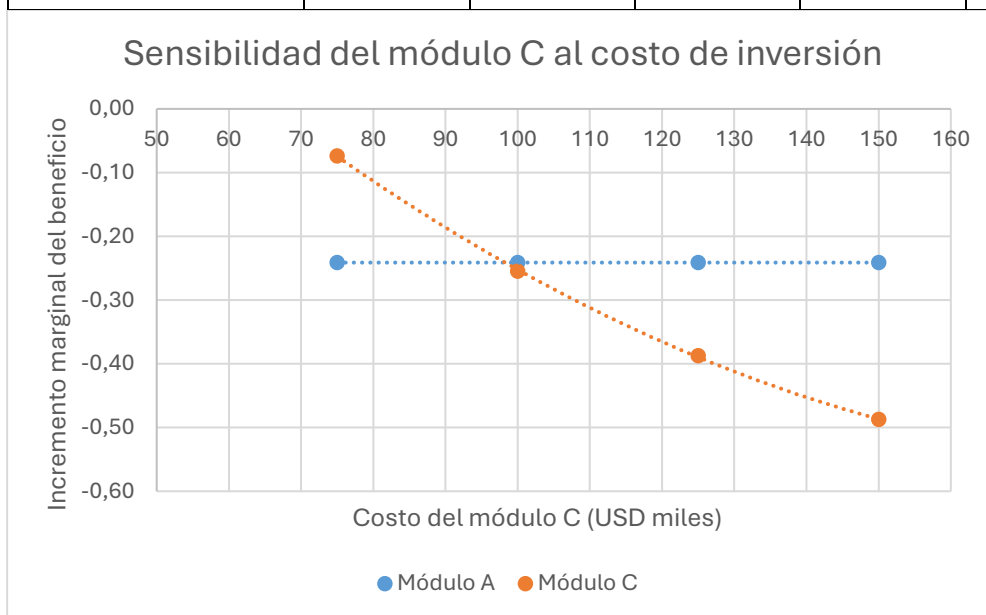
ΔQ	$\Delta \rho$	ΔI
70	150	170
Q_{BC}	ρ_{BC}	I_{BC}^*
100	550	268
C_{BA}	0,77	
Incremento relativo		$\Delta C/C$
		-0,39



La reducción de costos asociada al módulo C no resulta suficiente para justificar el desplazamiento de ninguno de los otros módulos dentro del orden de priorización definido previamente.

La sensibilidad del beneficio marginal del módulo C a costo de inversión se muestra en la tabla y gráfica siguientes en la que se observa también el del módulo A sin variación en el costo.

Inversión (USD miles)	C _A	C _B	C _C	B+A	B+C
75	0,62	1,25	0,73	-0,24	-0,07
100	0,62	1,25	0,50	-0,24	-0,25
125	0,62	1,25	0,36	-0,24	-0,39
150	0,62	1,25	0,28	-0,24	-0,49



Se observa que el comportamiento de la diferencia marginal del módulo C frente a la inversión corresponde a una función cuadrática decreciente del costo, en concordancia con la formulación del modelo. La reducción progresiva del costo de inversión atenúa la penalización económica asociada al módulo C y acerca su incremento marginal relativo al del módulo A.

No obstante, para el nivel del 33,3 % (100 mil USD), el incremento marginal relativo del sistema al incorporar el módulo C continúa siendo ligeramente inferior al correspondiente a la alternativa B+A. Esto confirma que, si bien el subsidio mejora el desempeño marginal del módulo C, no resulta suficiente para alterar el orden de priorización previamente establecido.

Para niveles de reducción superiores a dicho porcentaje, el módulo C logra reemplazar al módulo A dentro del orden de priorización.

En consecuencia, el ejemplo refuerza que la decisión óptima no está determinada por los valores absolutos del rendimiento económico individual, sino por la comparación de los incrementos marginales relativos dentro del sistema agregado.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los ejemplos numéricos permiten evidenciar varias implicaciones relevantes del modelo propuesto. En primer lugar, se observa que la priorización de módulos no depende exclusivamente de su rendimiento económico individual, sino de su contribución marginal relativa al sistema agregado. Este comportamiento contrasta con enfoques tradicionales de evaluación costo-beneficio, en los cuales las decisiones suelen basarse en indicadores absolutos, sin considerar la interacción dinámica entre los componentes del sistema.

En segundo lugar, el modelo demuestra una alta sensibilidad frente a la variable de inversión, debido a su penalización cuadrática en la formulación del parámetro compuesto. Esto implica que proyectos con elevados costos relativos pueden ser desplazados en el orden de ejecución, incluso cuando presentan altos niveles de caudal o densidad poblacional. Desde una perspectiva económica, este resultado es consistente con el principio de eficiencia en la asignación de recursos, al priorizar inversiones que maximizan el retorno relativo en etapas tempranas del proyecto.

Asimismo, el análisis de sensibilidad confirma la estabilidad del modelo frente a variaciones moderadas en los costos de inversión, manteniendo el orden de priorización en un rango significativo de escenarios. Este comportamiento refuerza la robustez del enfoque propuesto como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas.

Finalmente, los resultados evidencian que el modelo captura adecuadamente el efecto de economías de escala derivadas de la interconexión de módulos, lo cual constituye una ventaja frente a metodologías que evalúan los componentes de manera independiente. En conjunto, estos hallazgos validan la coherencia teórica del modelo y su potencial aplicación en contextos reales de planificación de infraestructura sanitaria.



Este comportamiento muestra que el modelo no solo ordena alternativas, sino que redefine la lógica de priorización al incorporar la interacción económica entre módulos.

CONCLUSIÓN

El presente estudio desarrolló una metodología de priorización económica para proyectos de saneamiento ejecutados bajo esquemas modulares, fundamentada en el principio del beneficio marginal y formalizada mediante una función multivariable de rendimiento económico. A través de la definición de un parámetro compuesto que integra caudal, densidad de usuarios e inversión, y del análisis de su incremento marginal relativo, se estableció un criterio objetivo y reproducible para determinar el orden óptimo de ejecución de módulos constructivos.

La metodología propuesta permite capturar de manera explícita la interacción entre los componentes del sistema, reconocer economías de escala derivadas de la infraestructura compartida y penalizar adecuadamente soluciones de alto costo relativo. En contraste con enfoques estáticos tradicionales, el modelo prioriza aquellas inversiones que generan mayor retorno económico temprano, contribuyendo a mejorar el perfil de repago del financiamiento y a reducir el riesgo financiero del proyecto.

El modelo utiliza un enfoque heurístico tipo *greedy* que selecciona la mejor opción local. En redes con dependencias hidráulicas críticas, el orden resultante debe ser validado por la viabilidad técnica de interconexión física.

Es una herramienta de soporte para la toma de decisiones estratégicas que permite a las empresas de servicios públicos justificar ante entes reguladores o financieros la priorización de inversiones basada en rentabilidad social y económica.

El primer ejemplo numérico desarrollado evidencia la capacidad del modelo para discriminar alternativas mediante un análisis marginal explícito, validando su coherencia analítica y su utilidad práctica.

En el segundo ejemplo el análisis de sensibilidad demuestra la estabilidad del modelo, manteniendo el orden B->A-> C pese a reducir un 16.7% el costo del Módulo C. Se validó la penalización cuadrática de la inversión, protegiendo la sostenibilidad financiera frente a proyectos costosos. El Módulo C solo desplazaría al A con un subsidio superior al 33.3%, ofreciendo una métrica clave para negociaciones



estratégicas. Finalmente, se ratifica que la prioridad depende del incremento marginal relativo del sistema agregado y no de valores económicos absolutos.

No obstante, el modelo presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas en su aplicación. En primer lugar, se trata de un enfoque heurístico de tipo greedy, por lo que la solución obtenida corresponde a un óptimo local y podría diferir de una solución global en sistemas altamente complejos. En segundo lugar, la metodología se enfoca en la optimización del CAPEX y no incorpora de forma explícita los costos operativos (OPEX) ni variables asociadas al mantenimiento a largo plazo. Asimismo, el modelo asume la disponibilidad de información confiable sobre caudales, densidades e inversiones, lo cual puede representar una restricción en contextos con alta incertidumbre. Finalmente, en redes con dependencias hidráulicas críticas, el orden de priorización debe ser validado mediante criterios técnicos de viabilidad física.

A pesar de estas limitaciones, la metodología presenta un alto potencial de aplicación práctica en la planificación de proyectos de saneamiento. En particular, puede ser utilizada como herramienta de apoyo en la estructuración de inversiones bajo esquemas modulares, en la priorización de proyectos dentro de portafolios de infraestructura y en la optimización del perfil de ejecución del CAPEX. Asimismo, el modelo ofrece una base cuantitativa útil para la negociación de subsidios o financiamiento, al permitir identificar umbrales de inversión a partir de los cuales ciertos módulos se vuelven económicamente prioritarios. De igual forma, su carácter transparente y reproducible facilita la justificación técnica de decisiones ante entidades reguladoras, organismos financieros y actores institucionales.

En conjunto, la metodología constituye un aporte práctico y teóricamente consistente para la planificación estratégica de sistemas de saneamiento, ofreciendo un marco transparente y adaptable que puede ser extendido a otros tipos de infraestructura sujeta a ejecución progresiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-benefit analysis: Concepts and practice* (5th ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108235594>



- Briscoe, J., & Garn, M. (1999). *Financing water supply and sanitation*. World Bank.
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11892>
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models and applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., & Lavelle, J. P. (2019). *Engineering economic analysis* (14th ed.). Oxford University Press.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Engineering economy*. McGraw-Hill Education.
- Park, C. S. (2019). *Contemporary engineering economics*. Pearson.
- World Bank. (2023). *Financing Wastewater Management*.
- Mays, L. W. (2010). *Water Resources Engineering*. Wiley.
- Belli, P., et al. (2001). *Economic Analysis of Projects*. World Bank Publications.
- Aris, R. (1989). *Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics*. Dover Publications.

