

# Localización de planta de tratamiento de agua aplicando técnicas de optimización

Alejandro Ruberto, Jorge V. Pilar y Marcelo Justo M. Gómez

## Resumen

Se presenta un estudio realizado para encontrar la mejor ubicación de la planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, en el Impenetrable Chaqueño, de manera tal de minimizar los impactos negativos provocados por su construcción y operación.

Para ello se formuló un modelo de apoyo a la decisión basado en una técnica de optimización multiobjetivo, incorporando una variante de “relajamiento difuso”.

Se tuvieron en cuenta aspectos relevantes, como riesgo sanitario, molestias a la población, costos, además de otros de naturaleza técnica.

El abordaje que se presenta en este trabajo buscó minimizar las valoraciones subjetivas que se dan en procesos de selección de alternativas.

Palabras clave: minimización de impactos, optimización multiobjetivo, relajamiento difuso, agua potable.

## Introducción

La ciudad de Misión Nueva Pompeya se localiza en el Impenetrable Chaqueño, a 190km de Juan José Castelli, cabecera del departamento Gral. Güemes.

Cuenta con una población de poco más de 5.000 habitantes, a la que se suma una población periurbana de cerca de 1.600 habitantes, totalizando alrededor de 6.600 personas.

Actualmente, su fuente de provisión de agua es el río Bermejito, que pasa al este de la ciudad. Sin embargo, este río presenta problemas estacionales e interanuales de calidad y cantidad (BIRF [1]).

Por ello, la empresa SAMEEP (empresa del

Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería – UNNE  
aruberto@ing.unne.edu.ar; jpilar@ing.unne.edu.ar;  
marcelogomez@ing.unne.edu.ar

Gobierno del Chaco, proveedora de servicios de agua potable y cloacas) decidió la construcción de un sistema de distribución de agua potable, que se abastecería con un acueducto que tomaría agua del río Teuco. La idea es que ese acueducto transporte agua no tratada y la potabilización se realice en una planta que se construirá en la ciudad de Misión Nueva Pompeya o sus inmediaciones (Figura N°1).

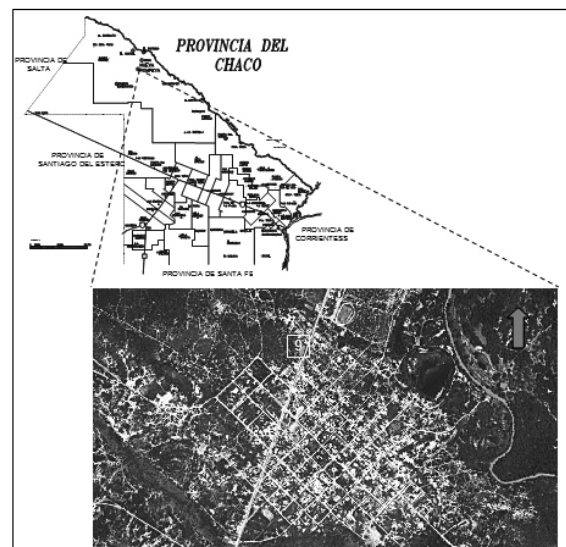


Figura N°1. Ubicación e imagen satelital de Misión Nueva Pompeya y alrededores. Fuente: Google Earth 2011.

La provisión de agua de buena calidad y en suficiente cantidad es ciertamente beneficiosa para cualquier población. Sin embargo la construcción y funcionamiento de las obras traen aparejados impactos ambientales, sociales y económicos no deseados.

La localización de una planta de tratamiento (potabilización) es una de las cuestiones que más fricciones genera en materia de agua potable. Por ello, el desafío consistía, en buscar una ubicación que minimizara los impactos negativos, teniendo en cuenta que ninguna de las alternativas de emplazamiento posibles se mostraba ni absolutamente mejor, ni absolutamente peor que las otras. Utilizando el léxico propio de la Teoría de la Decisión, ninguna constituyó una solución dominante o dominada, según el criterio de Pareto.

Elegir una sola opción entre varias posibles y teniendo en cuenta varios criterios simultáneamente es, además de una tarea difícil, una fuente de potenciales conflictos.

Este tipo de situaciones y su solución viene siendo estudiado en las últimas décadas por la Investigación de Operaciones, y las técnicas desarrolladas para abordar estos problemas son conocidas como "Técnicas de Análisis Multiobjetivo" (Barbosa [2]; Cohon [3]; Eppen et al [4]; Pilar [5]). Ellas son una importante herramienta de apoyo a la decisión, en especial en cuestiones de interés público.

La formulación objetiva de un problema de toma de decisión es siempre complicada, por la imprecisión e incertidumbre inherentes, que generan un ambiente no siempre claro para el decisor. Los conceptos y definiciones asociados a la optimización multiobjetivo/multicriterio, acertados o equivocados, intentan objetivar de alguna manera el subjetivo proceso de decisión, rompiendo con el mito de la decisión óptima en el más puro y abstracto sentido matemático. Algunos autores definen a estos métodos como una tercera alternativa a la eterna dicotomía entre pragmatismo y purismo (Barredo Cano [6]).

Para abordar el problema de escoger el sitio de emplazamiento de la planta de tratamiento para un acueducto que abastezca de agua potable a la ciudad de Misión Nueva Pompeya se aplicó la técnica de optimización multiobjetivo

conocida como "Método de Análisis Jerárquico", desarrollado por Saaty (Saaty [7]), con una variante de "relajamiento difuso", propuesta por Pilar [5], que aplica conceptos de lógica difusa (fuzzy logic).

### El método de análisis jerárquico

Un proceso de toma de decisión, en el que una persona o grupo de personas esté evaluando varias alternativas podría asimilarse analógicamente a un "pesaje". Según esta analogía, las decisiones surgirían de comparar medidas físicas muy precisas, por ejemplo "pesos".

Comparar (pesar) al mismo tiempo todas las alternativas en cuestión entre sí es una tarea prácticamente imposible. Pero sí es posible realizar comparaciones "paritarias" entre ellas, es decir, de a dos por vez.

Si el resultado de estas comparaciones se vuelca en una matriz, se tendrá algo semejante a lo indicado en la Figura N°2.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura N°2. Matriz de las comparaciones paritarias entre alternativas

En la matriz "A" de la Figura N°2, "a12" representa la importancia relativa entre la alternativa "1" y la "2". Por tal motivo, esta matriz "A" será recíproca, es decir que lo que está por arriba de la diagonal principal será recíproco de lo que se encuentra por debajo de la misma.

En la analogía de los pesos y suponiendo que la alternativa "1" pese, por ejemplo, w1 = 50g y la "2", w2 = 40g se tendrá:

$$a_{12} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{50g}{40g} = \frac{5}{4} \tag{1}$$

Si en la matriz "A" cada elemento "aij" es reemplazado por una relación semejante a la indicada en (1), se tendrá una matriz como la mostrada en la Figura N°3.



$$A = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_1}{W_2} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \\ \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{bmatrix}$$

Figura N°3. Interpretación de la matriz de comparaciones paritarias

No sería esperable que matrices de este tipo sean elaboradas cada vez que se vaya a tomar una decisión, trascendente o no. Sin embargo, si se espera que la decisión tenga visos de ecuanimidad, el proceso no debería apartarse mucho de lo recién indicado.

Continuando con el razonamiento, si se considerase la línea “i” de la matriz “A” mostrada en la Figura N°2 (a<sub>i1</sub> ; a<sub>i2</sub> ; .... ; a<sub>ij</sub> ; .... ; a<sub>in</sub>), si se multiplicase el primer elemento de esa línea por “w<sub>1</sub>”, el segundo por “w<sub>2</sub>”, y así en más, se tendrá:

$$\frac{W_i}{W_1} \cdot w_1 = w_i \quad \frac{W_i}{W_2} \cdot w_2 = w_i \dots \frac{W_i}{W_j} \cdot w_j = w_i \dots \frac{W_i}{W_n} \cdot w_n = w_i \quad (2)$$

Si esto mismo se hiciera con los juicios reales (ya no con los ideales), se obtendría una línea (vector línea), cuyos elementos representarían la “dispersión estadística” del juicio elaborado sobre el valor de “w<sub>i</sub>”. Luego, parece válido utilizar como estimativa de “w<sub>i</sub>” al promedio de estos valores (Saaty [7]).

Caso ideal:  $w_i = a_{ij} \cdot w_j$  (para i y j variando de 1 hasta n) (3)

Caso más real:  $w_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j$  (4)

Entonces, suponiendo que se tenga una matriz “A”, formada por juicios (comparaciones) “precisos” y otra matriz “A’”, que sea una estimativa aproximada de “A”, se podrá escribir lo siguiente:

$$A' \cdot W = \lambda_{MAX} \cdot W \quad (5)$$

Se puede demostrar que, en el caso de que la “A’” sea una matriz consistente, o sea con juicios o ponderaciones coherentes, la (5) tiene solución única y en ella “λ<sub>MAX</sub>” es el mayor autovector de “A’”, mientras que “w” es su autovector. Este autovector representará el “vector de prioridades” de las alternativas que se están analizando, según el criterio utilizado en la elaboración de las comparaciones.

Es posible percibir que, cuanto más parecido sea “λ<sub>MAX</sub>” al número de alternativas que están siendo comparadas (n), más consistente será el juicio de valor que se elaboró (matriz A’). Además, se puede demostrar que siempre será “λ<sub>MAX</sub>” n. El método prevé mecanismos para verificar la consistencia de las comparaciones paritarias.

Saaty propone utilizar una escala 1 a 9 pues, según el autor, nuestro cerebro es capaz de reconocer hasta 9 niveles de “matices” en una comparación simultánea.

### El “relajamiento difuso”

Cada vez que los tomadores de decisiones deben llenar las matrices de comparaciones paritarias descritas anteriormente, se puede percibir en ellos cierta incomodidad al tener que asignar un puntaje preciso y de preferencia entero a esas comparaciones.

Para intentar resolver este conflicto, Pilar [4] propuso el artificio de “relajar” esta puntuación, haciendo uso de algunas nociones de la lógica difusa.

La lógica difusa utiliza el concepto de “grado de membresía”, que indica la seguridad o certeza que se tiene respecto a que un elemento pertenezca a un conjunto. En la teoría clásica de conjuntos, que se basa en la “lógica booleana”, un elemento o bien pertenece a un conjunto dado, o bien no pertenece a él. La lógica difusa admite la pertenencia parcial, lo que la hace especialmente interesante para incorporar el análisis de sensibilidad al propio proceso de toma de decisión (Pilar [8]).

Otro concepto interesante de la lógica difusa es el de “número difuso”, que se utiliza para caracterizar un dato subjetivo y que no debe ser entendido como una variable aleatoria: es una estimativa y no una medida.

Pilar [5] propuso que cuando se realizan las comparaciones paritarias, al estimarse la relación “ $a_{ij}$ ”, que define el peso relativo que el decisor atribuye al elemento “ $i$ ” sobre el “ $j$ ”, en caso que dicho valor sea mayor que la unidad, el mismo podría variar de un valor “ $n$ ”, con un grado de membresía máximo, hasta “ $n-z$ ” y “ $n+z$ ” (siendo  $z$  cualquier número entero “pequeño”, por ejemplo 1), con grados de membresía nulos en ambos casos. En caso de ser menor que la unidad, podría variar entre “ $1/n$ ”, con grado de membresía máximo, hasta “ $1/(n+z)$ ” y “ $1/(n-z)$ ”, como límites inferior y superior, respectivamente, y con grados de membresía nulos. En este trabajo se adoptó  $z = 1$ , por lo que el número difuso triangular resultante queda como el mostrado en la Figura N°4.

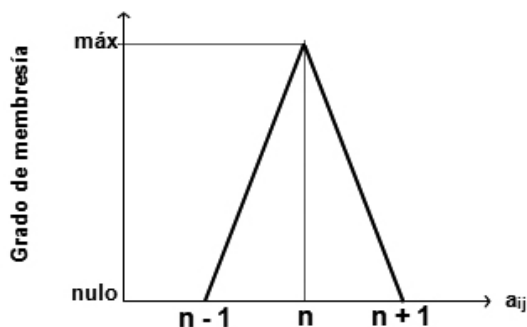


Figura N°4. Caracterización difusa de la relación “ $a_{ij}$ ”

Entonces, siguiendo este razonamiento, las matrices de comparaciones paritarias podrían tener tres valores por celda: uno correspondiente al grado de membresía máximo y los dos restantes, uno superior y otro inferior, con grados de membresía nulos.

Luego, continuando el procedimiento del Método del Análisis Jerárquico, se deberían calcular tres autovectores: uno para las comparaciones con grado de membresía máximo, otro para los valores que representan los límites superiores de estas comparaciones (grado de membresía nulo) y el restante para los valores que representan los límites inferiores de las comparaciones (también con grado de membresía nulo).

### Elección del sitio de emplazamiento de la planta de tratamiento

Para aplicar el “Método del Análisis Jerárquico” al problema de decidir la localización de la

planta de tratamiento de agua para la ciudad de Misión Nueva Pompeya se consideraron 4 aspectos:

- a) Social: que tiene en cuenta el riesgo sanitario y las molestias a la población;
- b) Ambiental: que considera el desmonte, la modificación del paisaje, la alteración de los suelos y de la morfología;
- c) Dificultades técnicas: en lo relacionado al tratamiento del agua y la disposición final de los lodos residuales; y
- d) Económico.

Es importante que estos aspectos reflejen la problemática sin redundancias, es decir, deben ser independientes. Es de destacar que, en otro caso, inclusive en este mismo caso, diferentes analistas podrán escoger otros aspectos a ser tenidos en consideración.

El resultado de las comparaciones paritarias primarias (sin relajamiento difuso) entre los aspectos considerados es mostrado en la Figura N°5. Hecho el correspondiente análisis de consistencia, se verificó que los juicios representados en esta matriz fueron coherentes.

	Aspectos sociales	Aspectos ambientales	Aspectos técnicos	Aspectos económicos
Aspectos sociales	1,00	3,00	3,00	5,00
Aspectos ambientales	0,33	1,00	1,00	1,67
Aspectos técnicos	0,33	1,00	1,00	1,67
Aspectos económicos	0,20	0,60	0,60	1,00
Sumatoria	1,87	5,60	5,60	9,34
1/Sumatoria	0,53	0,18	0,18	0,11
Valor normalizado	0,53	0,18	0,18	0,11

Figura N°5. Comparaciones paritarias entre los aspectos que fueron considerados.

La línea inferior de la matriz de la Figura N°5 es el vector de prioridades, que refleja la preferencia de los decisores: el aspecto “social” representa 53% de su decisión, el aspecto “ambiental” 18%, las cuestiones “técnicas” también 18% y las “económicas” 11%.

Posteriormente, a la matriz de la Figura N°4 se la aplicó el “relajamiento difuso” explicado en párrafos anteriores. En la Figura N°6 se muestra en una gráfica con los resultados finales de esas comparaciones.



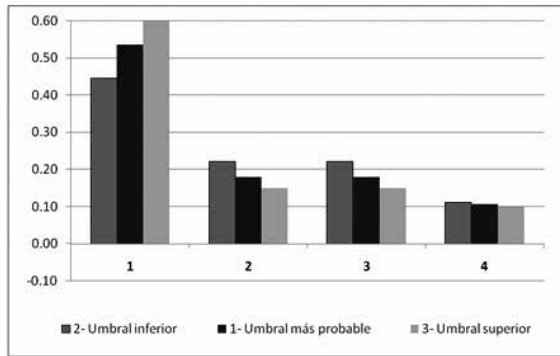


Figura N°6. Resultado final de las comparaciones paritarias, incluido el relajamiento “difuso”.

Se evaluaron tres alternativas de localización (ver Figura N°7):

- 1) planta sobre la Ruta Provincial N° 9;
- 2) planta en la ciudad y
- 3) planta cercana al río Bermejo.



Figura N°7. Alternativas de localización en Misión Nueva Pompeya

Siguiendo en Método de Análisis Jerárquico, las tres alternativas se compararon entre sí, en forma paritaria, según cada uno de los cuatro aspectos considerados y utilizando la misma escala (de 1 a 9) que en la comparación mostrada en la Figura N°5. Con ello, se obtuvieron cuatro nuevos autovectores, que representan las preferencias de cada una de las tres alternativas de ubicación, según cada uno de los cuatro aspectos considerados.

En la Figura N°8 se presentan las comparaciones antes mencionadas entre las tres alternativas de localización evaluadas.

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	5	2
Alt 2	0,2	1	0,4
Alt 3	0,5	2,5	1
$\Sigma$	1,7	8,5	3,4
$1/\Sigma$	0,59	0,12	0,29

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	5	2
Alt 2	0,2	1	0,4
Alt 3	0,5	2,5	1
$\Sigma$	1,7	8,5	3,4
$1/\Sigma$	0,59	0,12	0,29

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	0,33	0,17
Alt 2	3	1	0,50
Alt 3	6	2	1
$\Sigma$	10	3,33	1,67
$1/\Sigma$	0,10	0,30	0,60

	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	3	3
Alt 2	0,33	1	1
Alt 3	0,33	1	1
$\Sigma$	1,67	5	5
$1/\Sigma$	0,60	0,20	0,20

Figura N°8. Comparaciones entre las tres alternativas de localización analizadas

Finalmente, fue preciso integrar todos los juicios (los cuatro autovectores de los últimos renglones de las matrices de la Figura N°8) para hacer una valoración final de estas alternativas. Entonces, se conformó con ellos una nueva matriz, la que se multiplicó por el vector de preferencias obtenido de la Figura N°5 (última línea de la matriz mostrada en esa figura) y por los otros dos vectores que surgieron del “relajamiento difuso” de la matriz presentada en esa misma figura.

Como resultado se obtuvieron tres vectores (Figura N°9), que representan la preferencia de los decisores por cada una de las alternativas: uno correspondiente a la puntuación que en el contexto de este trabajo se denominó “más probable”, y los otros dos correspondiendo a los umbrales “superior” e “inferior” del relajamiento “difuso” de la matriz presentada en la Figura N°4.

Ello permitió clasificar a las alternativas de localización de la planta de tratamiento según un orden de mérito o “ranking” (Figura N°9). La localización junto a la Ruta Provincial N° 9 obtuvo el primer orden de prioridad.

Localización	Resultados			
	Umbral inferior	Valor más probable	Umbral superior	Ranking
Planta sobre la Ruta	0,48	0,51	0,52	1°
Planta en la ciudad	0,17	0,16	0,16	3°
Planta cercana al río	0,35	0,34	0,33	2°

Figura Nº 9. Orden de preferencia de las alternativas de localización analizadas

## Conclusiones y recomendaciones

La aplicación de una técnica de optimización multiobjetivo/multicriterio permitió dar un poco de objetividad al proceso decisorio de elegir una entre tres alternativas posibles de localización de la planta de tratamiento para abastecer de agua potable a la ciudad de Misión Nueva Pompeya, siendo que a priori ninguna de esas alternativas se mostraba ni mejor ni peor que las otras.

Según las ponderaciones efectuadas y según el parecer de los decisores, la alternativa de localización junto a la Ruta Provincial N° 9 sería la que minimizaría los impactos negativos que provocarían la construcción y operación de la planta.

Se utilizó el “Método del Análisis Jerárquico”, de sólida base matemática y lógica, adoptando una variante de “relajamiento difuso” de las puntuaciones.

Sería deseable aprovechar la buena aceptación que mostró este tipo de abordaje, es decir la utilización de técnicas de optimización multiobjetivo/multicriterio, para aplicarlo a otras situaciones conflictivas, con lo cual se podría ganar en objetividad a la hora de tomar decisiones trascendentes, especialmente en cuestiones de interés público.

## Referencias bibliográficas

[2] Barbosa, P.S.F. (1997). O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos. *Água em revista*. n8, pp 42-46.

[6] Barredo Cano, J.I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio*. Madrid: RA-MA. 264p.

[3] Cohon, J.L. (1991). *Multiobjective programming and planning*. New York: Academic Press. 333p.

[4] Eppen, G.D., Gould, F.J., Schmidt, C.P., Moore, J.H., Weatherford, L.R. (2000). *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*. México: Prentice-Hall. 792p.

[1] BIRF, PRESTAMO 7992/OC-AR. LINEA DE BASE AMBIENTAL. (2013). Programa de infraestructura hídrica del norte grande - agua potable y drenajes urbanos. “Proyecto de Abastecimiento de Agua Potable a las localidades de Wichi-El Sauzal-Misión Nueva Pompeya y Fuerte Esperanza”. Provincia del Chaco.

[5] Pilar, J.V. (2003). Utilización de un modelo de apoyo a la decisión con relajación “difusa” para la elección de la traza de una defensa para el Gran Resistencia. In: Encuentro nacional de docentes de investigación operativa, 16, [e] ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EM INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 14., La Plata. Anales.

[8] Pilar, J.V. (2012). *Herramientas para la gestión y la toma de decisiones* (2da. Ed.). Salta: Editorial Hanne. 138p.

[7] Saaty, T. (1991). *Método de análisis jerárquica*. São Paulo: McGraw-Hill, Makron. 367p.