

Utilización de métodos multicriterio adaptados. Aplicación a un caso práctico del Proceso Analítico Jerárquico – PAJ

Autores:

Bach, Mauricio Javier

Giupponi, Emiliano

Sobrero, Francisco Santiago

Yori, María Victoria

INDICE

1.	Antecedentes	3
2.	Metodología.....	4
2.1.	Aplicación Práctica	6
2.1.1.	Jerarquía:	6
2.1.2.	Obtención de pesos:	7
2.1.3.	Cálculo de la calificación de las alternativas para cada criterio:	8
2.1.4.	Determinación de la puntuación global de cada alternativa:	13
3.	Conclusiones.....	15
4.	Anexo matemáticas.....	16
4.1.	Normalización.....	16
4.2.	Consistencia.....	17
5.	Anexo tablas.....	19
6.	Bibliografía Consultada	25

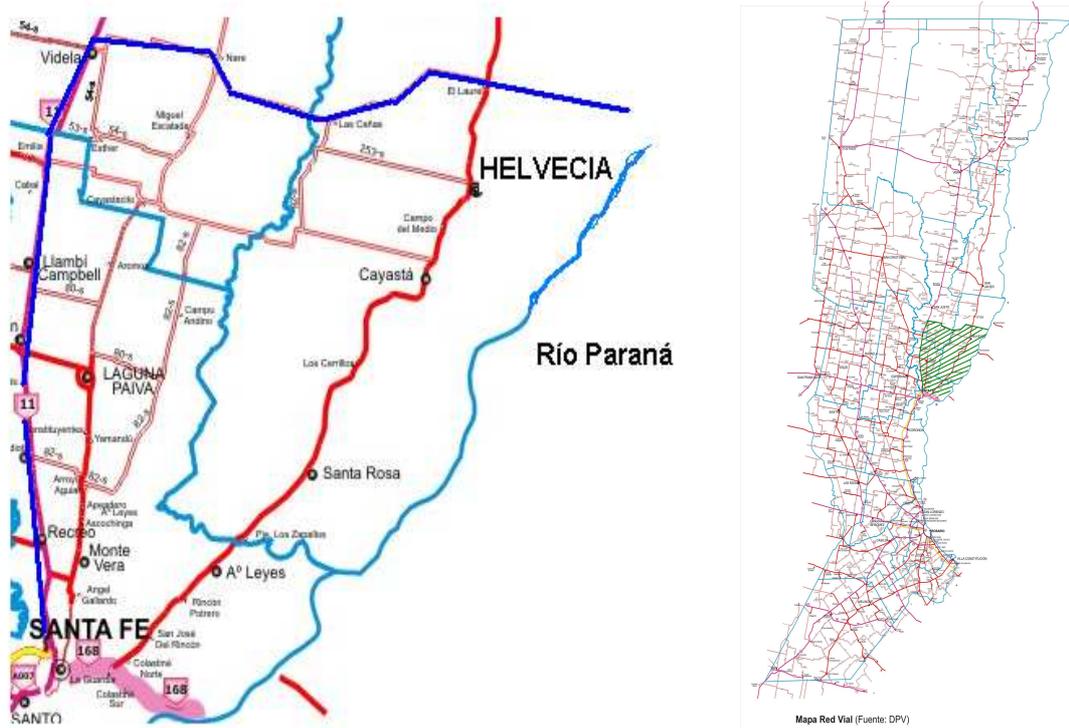
1. Antecedentes

En el año 2007/08 se formulo un proyecto financiado por la Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Santa Fe que consistió en estudiar las implicancias técnicas, económicas, ambientales, legales y sociales que tendría la realización de una obra de regulación hídrica que permitiría realizar el control de caudales ingresantes del Río Paraná al sistema hídrico Leyes- Setúbal.

La zona de influencia del estudio se ubicaba en el centro este de la Provincia de Santa Fe a la vera del río Paraná y abarcaba los departamentos San Javier, Garay y La Capital.

Con el proyecto se buscaba disminuir los efectos que provoca las inundaciones del Río Paraná en las zonas rurales y urbanas y los cortes en la ruta provincial Nro. 1 a la altura del puente del Arroyo Leyes.

Grafico 1: Zona de Influencia del proyecto



El proyecto tenía un importante impacto regional ya que abarcaba a más de 450 mil personas, incluía a más de 200 km de rutas y caminos rurales, afectaba cerca de 13.000 viviendas particulares y unas 17.240 Ha. de zonas urbanas y rurales.

Para dar solución a esta problemática se propusieron cuatro alternativas a saber: la alternativa 1 optimizar la situación actual realizando inversiones que mejoren las luces de

la RNA 168 y el mantenimiento de las defensas adyacentes a la RP 1, la alternativa 2 realizar una obra de regulación y alteo de defensas que permita el paso del 70% del agua proveniente de la inundación del Río Paraná a la Laguna Setubal através del Arroyo leyes, la alternativa 3 permitir el paso del 60% y la Alternativa 4 permitir el paso de solo el 50% del agua de inundación.

Debido a la complejidad del problema a solucionar para realizar la evaluación del proyecto se utilizo como metodología de análisis el cuadro de puntuación. Este procedimiento consiste en descomponer un objetivo complejo, de múltiples dimensiones, en sus atributos constitutivos más relevantes. Cada uno de estos atributos recibe una ponderación relativa que mide su importancia en la consecución del Objetivo General (Objetivo Complejo) con lo que -a la vez- se establecen valoraciones relativas entre los atributos que conforman el conjunto.

En relación con estos atributos se establecen criterios de satisfacción que son valorados por medio de escalas, que pueden ser de distinta naturaleza, tales como escalas cardinales, ordinales, nominales, dicotómicas. Precisamente, esta diversidad de escalas es la que permite capturar el grado de satisfacción de criterios sustantivamente diferentes, sean cuantitativos o cualitativos.

Las debilidades principales del Cuadro de Puntuación residen: 1) la asignación de peso relativo a los criterios se hace a partir de la subjetividad del analista, aunque esta pueda ser atenuada mediante el uso de ciertos procedimientos como el método Delphi o la ronda de expertos; y 2) En la posibilidad de que los procedimientos de puntuación contengan inconsistencias que no pueden ser verificadas.

Estas limitaciones pueden ser solucionadas –en buena medida- mediante la utilización del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), pues con este método se pueden reducir las afirmaciones conjeturales, las conclusiones no explicitadas o el comportamiento intuitivo que está íntimamente asociado al proceso de atribución de pesos relativos a los criterios y a la valoración de la medida en que las distintas soluciones propuestas (alternativas) satisfacen los objetivos específicos.

En el presente trabajo se realiza una aplicación de este método a la evaluación que oportunamente fue analizado con el cuadro de puntuación.

2. Metodología

El **Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)** consiste en una sencilla, lógica y estructurada metodología de trabajo, basada en la descomposición del problema en una estructura jerárquica. La jerarquía básica está conformada por: meta u objetivo general, criterios y alternativas. La jerarquía se construye de modo que los elementos de un mismo nivel

sean del mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel.

En una jerarquía típica el nivel más alto localiza el problema de decisión (objetivo). Los elementos que afectan a la decisión son representados en los inmediatos niveles, de forma que los criterios ocupan los niveles intermedios, y el nivel más bajo comprende a las opciones de decisión o alternativas.

La jerarquía resultante debe ser completa, no redundante y mínima (no debe incluir aspectos no relevantes). Su construcción es la parte más creativa del proceso y requiere de un consenso entre todas las partes implicadas en el proceso de decisión.

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso de AHP: la valoración de los elementos.

El decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. Esta tarea consiste en una comparación de valores subjetivos «por parejas» (comparaciones binarias). Las comparaciones binarias basándose tanto en factores cuantitativos (aspectos tangibles) como cualitativos (aspectos no tangibles), ya que presenta su propia escala de medida: la escala 1-9 propuesta por Saaty¹ y consiste en la comparación de dos elementos que cuando sean igualmente preferidos o importantes el decisor asignará al par de elementos un «1»; moderadamente preferido se representa por «3», fuertemente preferido por «5» y extremadamente preferido por «9». Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedias.

El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada «Matriz de comparaciones pareadas», de forma que cada uno de sus componentes reflejen la intensidad de preferencia de un elemento frente a otro respecto del atributo considerado.

Una vez formadas las matrices de comparación, el proceso deriva hacia la tercera etapa, la fase de priorización y síntesis. El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento, entendida esta prioridad tal y como la define Saaty: «Las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia».

¹Saaty, T. L., The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York 1980.

Realizada la comparación de los factores en la matriz y asignados los juicios de valor entre pares de factores, es necesario realizar el cálculo de peso para cada factor el cual describe en forma precisa las características de los juicios de valor considerados.

Finalmente, se calcula la razón de consistencia para verificar la asignación de juicios de valor, que si bien se intenta establecer con reglas claras y neutrales, es factible que estén afectadas por una cuota de subjetividad. No hay que olvidar que este proceso de asignación de juicios de valor es realizado por un proceso de decisión humana y estas desviaciones son azarosas.

La última etapa de este proceso es el denominado análisis de sensibilidad. El resultado al que se llega en la etapa anterior es altamente dependiente de la jerarquía establecida por el decisor y por los juicios de valor que realiza sobre los diversos elementos del problema.

2.1. Aplicación Práctica

Para realizar la aplicación de esta metodología al estudio de caso planteado se propusieron realizar los siguientes pasos:

- Jerarquía: consiste en la descomposición del problema (o el objetivo) en una estructura jerárquica, determinando i criterios, que serán útiles para evaluar cada una de las j alternativas o respuestas posibles al problema.
- Obtención de los pesos de cada criterio.
- Cálculo de la calificación de las alternativas para cada criterio.
- Determinación de la puntuación global de cada alternativa.
- Análisis de Sensibilidad

Luego de la determinación global de cada alternativa, se ordenará cada alternativa de proyecto según su puntuación, determinando la mejor opción para las obras de regulación en Arrollo Leyes.

2.1.1. Jerarquía:

En una primera etapa se construye una jerarquía básica, conformada por el Objetivo General, los criterios a ser usados y las alternativas de decisión. En este caso particular, los objetivos principales del Estudio Integral son, en primer lugar, lo atinente a la potencial obra de control de caudales ingresantes al Sistema Setúbal, y en segundo lugar, las recomendaciones relativas a la ruta Nacional N° 168. Las cuatro distintas alternativas propuestas para alcanzar ambos objetivos son: la situación actual optimizada, permitir el paso de 70%Q, permitir el paso de 60%Q y, por último, permitir paso de 50%Q.

Para evaluar cada alternativa, y poder determinar cuál es la mejor opción, se utilizarán los criterios Económicos y Sociales (ES), Institucionales y de Gestión (IG), Ambientales (A) y Técnico Hidráulico (TH).

2.1.2. Obtención de pesos:

La segunda tarea consiste en la comparación de los criterios de a pares (comparaciones binarias), con el objetivo de calcular la prioridad de cada elemento. Para ello se utilizará la escala de medidas propuesta por Saaty, El resultado de estas comparaciones es una «Matriz de comparaciones pareadas», como la que se muestra a continuación:

Cuadro N° 1:

	ES	IG	A	TH
Económicos y Sociales (ES)	1	3	1	3
Institucionales y de Gestión (IG)	0,33	1	0,33	1
Ambientales (A)	1	3	1	3
Técnico Hidráulicos (TH)	0,33	1	0,33	1
TOTAL	2,66	8,00	2,66	8,00
1/TOTAL	0,38	0,1	0,38	0,1

Del cuadro se puede interpretar, por ejemplo, que el criterio económico y social es moderadamente preferido al atributo institucional y de gestión.

Para la obtención de los pesos o prioridades de cada criterio es necesario normalizar la matriz. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Dividir cada elemento de tal matriz por el total de su columna, o lo que es lo mismo, determinar el inverso de cada columna y multiplicarlo por cada elemento de la matriz. La resultante se denomina matriz de comparaciones normalizada, presentada más abajo.
2. Calcular el promedio de cada fila, es decir, sumar cada renglón y dividirlo por el total de la matriz normalizada; de esta manera queda expresado el peso de cada factor.

Cuadro N°2:

Matriz normalizada	ES	IG	A	TH	TOTAL	vector de prioridades
Económicos y Sociales (ES)	0,38	0,4	0,38	0,4	1,50	0,38
Institucionales y de Gestión (IG)	0,13	0,1	0,12	0,1	0,50	0,12
Ambientales (A)	0,38	0,4	0,38	0,4	1,50	0,38
Técnico Hidráulicos (TH)	0,12	0,1	0,12	0,1	0,50	0,12
total					4,00	1,00

Una vez obtenido el vector de prioridades se cuenta con una valoración de la importancia relativa de cada uno de los criterios considerados. Es decir, si se interpreta la tabla se observa que el criterio Económico y Social tiene un peso de casi un 40%, mientras que el Institucional y de Gestión tiene un peso alrededor de un 10% sobre el total de la decisión.

2.1.3. Cálculo de la calificación de las alternativas para cada criterio:

La tercera etapa, comprende el análisis de las distintas opciones (alternativas) propuestas para valorar en qué medida éstas satisfacen cada uno de los criterios. Para ello, formamos una matriz de comparación por pares **para cada criterio** (de la misma manera que se construyó la matriz en el segundo paso). Luego es necesario normalizar cada una de las matrices para así poder obtener el vector de prioridades respecto de cada criterio.

▪ Cálculo de la calificación de las alternativas para el criterio Económico y Social

Para determinar la valoración de las alternativas respecto al criterio Económico y Social, es necesario estimar cuáles son los impactos negativos (costos) de cada una de las alternativas. Se podrían considerar también, los impactos positivos (beneficios) y la rentabilidad económica, pero para simplificar el análisis solo se utilizará la comparación de los costos. Para ello, se toma en cuenta las definiciones descriptas a continuación.

Se considera como *costo económico* del emprendimiento, el uso “real” de los recursos escasos y limitados de la sociedad, lo cual implica que aquellos gastos que no representen un “uso” de recursos no serán incluidos como costos económicos. Tal el caso de los impuestos y subsidios de todo tipo que representan transferencias entre sectores, por medio de la intervención estatal.

Del mismo modo, son tenidos en cuenta como “costos económicos” apropiables al proyecto, todos los impactos o efectos “negativos” que el emprendimiento genere

(deseconomías probables), en forma independiente de quién afronte su erogación o de quién perciba dicha lateralidad.

Una vez identificados los mismos, su valorización se realizará de acuerdo con los *precios de cuenta* correspondientes a cada una de las actividades involucradas.

Las *tasas económicas de descuento* utilizadas son las recomendadas usualmente por los organismos de Proyectos y Planeamiento del Estado Nacional.

Para el análisis propiamente dicho, se utilizará el valor actual de costos (VAC), los resultados obtenidos pueden apreciarse en el cuadro que se presenta a continuación:

Cuadro N° 3:

	Sin Obra de Regulación	Con Obra de Regulación		
	ALTERNATIVA 1- Situación Actual <u>Optimizada</u>	ALTERNATIVA 2 Pasa 70% de $Q_{R=100}$	ALTERNATIVA 3 Pasa 60% de $Q_{R=100}$	ALTERNATIVA 4 Pasa 50% de $Q_{R=100}$
VAC	\$ - 21.613.502	\$ -184.554.917	\$ -177.096.759	\$ -145.616.564

Como cada alternativa cuenta con magnitudes muy dispares es necesario normalizar las variables, para poder hacerlo se pueden utilizar algunos de los criterios de normalización expuestos en anexo matemáticas, esto le permite al decisor ordenar sus preferencias.

Para este caso se elige “**dividir por el peor valor que alcanza el criterio**” cada uno de los montos alcanzados por las distintas alternativas. En este ejemplo la Alternativa 2 es el peor valor alcanzado, luego se comparan con el resto de las alternativas.

Cuadro N° 4:

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Coeficiente	0,12	1,00	0,96	0,79

En base a este cuadro se determinan el orden de preferencia de una alternativa respecto de la otra, mostrando, por ejemplo, que la alternativa dos es la más costosa (con un puntaje de 1) seguida por la tres (con un puntaje de 0,96), por lo tanto ambas son las

menos preferidas. En base a esto, se resumen los resultados de estas comparaciones en un cuadro en el cual se asignan los puntajes correspondientes, siguiendo el mismo procedimiento que para la determinación del cuadro 1 en la sección 2. En el mismo se puede apreciar que la Alternativa 1 es extremadamente preferida respecto a la 2 y 3 y muy fuertemente preferida respecto a la 4. El mismo paso repite comparando una alternativa con otra.

Cuadro N°5:

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Alt 1	1	9	9	7
Alt 2	1/9	1	1	2
Alt 3	1/9	1	1	2
Alt 4	1/7	½	1/2	1
TOTAL	1,37	11,50	11,50	12,00
1/TOTAL	0,73	0,09	0,09	0,08

La próxima etapa consiste en normalizar la matriz para luego determinar el vector de prioridades para este criterio². En dicho vector se puede apreciar el orden de importancia, la alternativa 1 tiene un 72%, luego le siguen las alternativas 2 y 3 con el 11% y por último la 4 con el 7%.

En el último paso se verifica la consistencia de la matriz, para ello es necesario comprobar que se cumplan determinadas reglas matemáticas³ que permiten confirmar si las comparaciones pareadas presentan o no contradicciones entre sí. De contar con un grado aceptable de consistencia se puede continuar con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable se deben reconsiderar y posiblemente modificar los juicios de valor sobre las comparaciones pareadas antes de seguir con el proceso. Para este caso y tal como se puede ver en la tabla 2 del Anexo de tablas, la matriz cumple con los índices de consistencia preestablecidos.

²Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 1.

³ Se puede observar en el anexo matemático - Consistencia

- **Cálculo de la calificación de las alternativas para el criterio Institucional y de Gestión**

Para evaluar los aspectos institucionales y de gestión se consideró el grado de conflictividad del proyecto, teniendo en cuenta que las obras intentan modificar los complejos sistemas fluviales en beneficio de una disminución de las áreas inundables en el interior del sistema Setúbal, particularmente en las explotaciones mayormente ganaderas y, especialmente, el gran asentamiento urbano correspondiente a la ciudad de Santa Fe. Por ello, se consideró que si no se hace ninguna obra, los riesgos de inundación y, de por lo tanto, de conflicto serían positivos y en cualquier otro caso (alternativas 2, 3 y 4) no existiría conflicto. Como se puede observar, en este caso estamos considerando una variable cualitativa (binaria), mientras que si se utilizara el típico análisis costo beneficio para la toma de decisión no se podría incorporar.

Considerando a la alternativa uno de mayor conflicto, y a las otras tres como situaciones sin conflicto se deduce la matriz de comparaciones pareadas, de la misma forma que con el criterio anterior⁴. Del análisis de la matriz, se observa que las alternativas dos, tres y cuatro son extremadamente preferidas a la uno.

Posteriormente, se determinó la matriz normalizada con el respectivo vector de prioridades para este criterio⁵. Se obtuvo que las alternativas dos, tres y cuatro tienen el puntaje más alto equivalente a un 32% y la alternativa uno tiene un puntaje de sólo un 4%.

Por último, se verificó la consistencia de esta matriz, es decir si entre las comparaciones pareadas realizadas no se presentaba ningún tipo de contradicción en la valoración. Se verificó que dicha consistencia era perfecta⁶.

- **Cálculo de la calificación de las alternativas para el criterio Ambiental**

Para determinar los pesos de cada alternativa respecto al criterio ambiental, se estimó un costo por medidas de mitigación ambiental del 0,5% del monto de inversión. El valor actual de dicho costo resultó ser cero para la primera alternativa, \$9.112.151 para la segunda, \$8.799.529 para la tercera y \$8.492.529 para la cuarta. Es decir las tres últimas alternativas tienen un costo ambiental cercano a los \$9.000.000, mientras que la primera no tiene costo.

⁴ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 3.

⁵ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 4.

⁶ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 5.

Con dichos valores, se procedió a la determinación del vector de prioridades para el criterio ambiental. Para ello, se realizó comparaciones por pares usando la misma escala que para la obtención de pesos (escala de 1 al 9), y teniendo en cuenta los valores actuales netos de cada alternativa. Se obtuvo la Matriz de comparaciones pareadas⁷, que muestra que la alternativa uno es extremadamente preferida a las alternativas dos, tres y cuatro. Luego se procedió a la normalización de la tabla, y a la determinación del vector de prioridades⁸. El resultado fue que la alternativa uno tiene una puntuación del 75% respecto al criterio ambiental mientras que las otras tres, sólo alcanzan un 8%.

En la verificación de la consistencia de este criterio también se presenta un caso de consistencia perfecta⁹.

▪ **Cálculo de la calificación de las alternativas para el criterio Técnico Hidráulico**

Para analizar y comparar los aspectos técnicos se tuvo en cuenta la superficie productiva recuperada para cada alternativa. Al existir una amplia magnitud entre las distintas alternativas, se normalizaron las variables comparándose las mismas con la alternativa 4 que es la que tiene la máxima superficie recuperada¹⁰, siguiendo el mismo procedimiento que en el inciso 3.1. Se llegó a los resultados que se muestran a continuación.

Cuadro N° 6

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
superficie productiva recuperada (Ha)	0	6.000	12.000	17.240

Luego se procedió a armar la matriz de comparaciones pareadas¹¹ en donde se observa que la alternativa 4 es extremadamente preferente respecto a la 1, es fuertemente preferente respecto a la 2 y moderadamente preferente respecto a la 3. Posteriormente se normaliza la matriz determinando el vector de prioridades¹² que nos indica que la Alternativa 4 tiene un puntaje del 57%, le sigue la alternativa 3 con el 27%, la 2 con el 11% y por último la 1 con el 5%.

⁷Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 6.

⁸Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 7.

⁹ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 5.

¹⁰ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 9

¹¹ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 10

¹² Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 11

Se verificó también que la consistencia de este criterio también presenta un índice de consistencia que permite continuar con el proceso¹³.

2.1.4. Determinación de la puntuación global de cada alternativa:

Para determinar cual es la alternativa a seleccionar, se determina una puntuación global para cada opción. Para ello, se utilizarán los vectores de prioridades obtenidos para cada uno de los atributos evaluados¹⁴ (Costo de Obras, Riesgo de Conflicto, Costos Ambientales, Superficie Recuperada), y los porcentajes que están en el vector de prioridades obtenido en el paso 2 para analizar los distintos criterios (económicos, institucionales y de gestión, ambientales y técnicos¹⁵). Al combinar las tablas se obtiene la valoración final para cada alternativa.

Procedamos a explicar esto con más detalle. Para determinar el puntaje global de la alternativa 1, en primer lugar, se multiplica la ponderación de cada criterio por el valor del mismo para esa alternativa en particular. Por ejemplo, el peso del criterio costos (de un 38% tal como lo dice la tabla 14) se multiplica por la valoración de dicho criterio para la alternativa 1, que es de un 72%(ver tabla 13 del anexo). Este mismo procedimiento se realiza el con todos los criterios. Seguidamente, se suman los porcentajes conseguidos, lo que determina la puntuación global para la alternativa 1.

El mismo procedimiento se repite para cada alternativa, obteniendo como resultado los puntajes que se presentan en el cuadro 7.

Cuadro N° 7

	%	Ranking
Alt 1	56%	1
Alt 2	13%	4
Alt 3	15%	3
Alt 4	17%	2

Del cuadro surge que la alternativa 1 obtuvo el mayor porcentaje (56%), por lo tanto es la alternativa elegida. Luego le siguen en orden de prioridad la 4, 3 y 2.

¹³ Se puede observar la misma en el anexo de tablas, tabla 12.

¹⁴ Dichos vectores se encuentran resumidos en la tabla 13 en el anexo de tablas.

¹⁵ Dichos vectores se encuentran resumidos en la tabla 14 en el anexo de tablas.

2.1.5. Análisis de Sensibilidad

Como los resultados dependen de la jerarquía establecida por el decisor y por los juicios de valor asignados de manera subjetiva a los distintos criterios, este procedimiento permite evaluar que modificaciones podrían tener las alternativas seleccionadas ante cambios en la asignación de pesos de los distintos criterios.

En un primer análisis se propone asignar el mismo peso a los distintos criterios evaluados, para el caso asignarle el 25% a cada uno de los criterios Económico y Social, Institucional y de Gestión, Técnico y Ambiental¹⁶. Aplicando la metodología expuesta en el punto anterior se obtiene un nuevo ranking de alternativas. En el cuadro se puede observar que si bien cambia el porcentaje obtenido para cada alternativa, no varía el orden de selección.

Cuadro N° 8

	%	ranking
Alt 1	39%	1
Alt 2	16%	4
Alt 3	20%	3
Alt 4	26%	2

Se realiza un segundo análisis que propone invertir los pesos asignados originariamente a los distintos criterios otorgándole un peso del 38% a los criterios Institucional y de Gestión y Técnico y asignándole un peso del 12% criterios Económico y Ambientales¹⁷. En este caso se modifica la elección de la alternativa pasando de ser la elegida la N°4.

Cuadro N° 9

	%	ranking
Alt 1	21%	3
Alt 2	19%	4
Alt 3	25%	2
Alt 4	36%	1

¹⁶Dichos vectores se encuentran resumidos en la tabla 15 en el anexo de tablas.

¹⁷Dichos vectores se encuentran resumidos en la tabla 16 en el anexo de tablas.

3. Conclusiones

A través del siguiente trabajo se demostró que el Proceso Analítico Jerárquico, es un método de evaluación de proyectos que permite incorporar otras dimensiones u objetivos en la de toma de decisiones, distintas a la eficiencia económica. En el caso particular de Proyecto “Estudio Integral del Río Paraná en su Tramo Medio y su Influencia en el Área de la Ciudad de Santa Fe”, no sólo se tuvo en cuenta el objetivo Económico y Social (único criterio que se considera en el análisis tradicional costo beneficio), sino que también se incluyeron como objetivos la viabilidad ambiental, las condiciones técnicas hidráulicas y las dificultades institucionales y de gestión.

Otra ventaja que presenta el método, es que permite incluir impactos de carácter intangibles o cualitativos en la decisión. En la intervención analizada, esto quedó demostrado cuando se incluyó en el análisis las posibilidades de contraer conflicto o no, dentro de las consideraciones institucionales.

Además, el método puede reducir las subjetividades relacionadas al proceso de atribución de pesos relativos a los criterios y a la valoración de la medida en que las distintas alternativas satisfacen los objetivos específicos, gracias a su metodología de comparaciones pareadas. Esta es una ventaja superadora respecto de otros métodos multicriterio como el cuadro de puntuación.

4. Anexo matemáticas

4.1. Normalización

Este concepto se relaciona con la practicidad en la formulación de un modelo multicriterio, pues es común que las evaluaciones r_{ij} vengan medidas en cualquier tipo de escala conocida, tales como: Cardinal ratio, Cardinal intervalo, Ordinal, Nominal, Difusa o Probabilística.

Esto ocurre porque diferentes criterios aplicados en el problema se manifiestan en diferentes unidades de medida; por ejemplo, medidas de distancias (provenientes de distintos sistemas métricos), diferentes unidades monetarias (en tiempo y en lugar de emisión), etc.

También es posible que, aun cuando se trate de criterios considerados en igual unidad de medida, los valores que alcance cada uno de ellos sean totalmente diferentes en magnitud, lo cual arrojará alta discrepancia con los otros aplicados.

Finalmente, tal como se ha consignado al describir algunos de los métodos, se debe requerir al decisor que provea alguna forma de ordenar sus preferencias. Esta tarea se ve altamente favorecida y facilitada cuando las opciones se presentan de manera normalizada.

Por todo lo expuesto, con la normalización se busca -cuando el método aplicado lo exija- hacer comparables las distintas evaluaciones cardinales r_{ij} de los distintos criterios.

Algunas formas de normalizar los valores son:

- a) **Dividir por el “mejor o peor” valor que alcanza el criterio.** El número divisor puede ser máximo o mínimo dependiendo del sentido en que se considere el criterio. Los valores resultantes quedarán expresados como porcentaje del máximo.

$$v_i = \frac{V_i}{\max V_j}$$

- b) **Dividir por el recorrido o rango que alcanza el criterio.** El número divisor en este caso es la diferencia entre el máximo y el mínimo alcanzado por el criterio. Los valores resultantes quedarán expresados como proporción del valor real con respecto a dicho rango.

$$v_i = \frac{V_i}{\max V_j - \min V_j}$$

- c) **Restar del “mejor” valor el valor real o (restar el “peor” del valor real), y dividir por el recorrido o rango que alcanza el criterio.** El número divisor es el

mismo del inciso b), mientras que el numerador lleva la diferencia “mejor - real” (o “real - peor”). Los valores resultantes quedan expresados como porcentaje del rango, con respecto a algún extremo.

$$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i}$$

4.2. Consistencia

Una matriz es consistente si los elementos de la matriz respetan el supuesto de (1) transitividad y (2) reciprocidad.

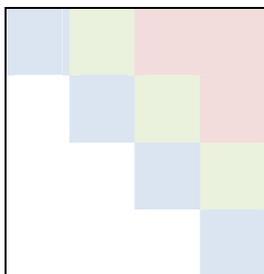
(1) $a_{i,j} = a_{i,k} \cdot a_{k,j}$ i, donde j and k son cualquier alternativa de la matriz

Ejemplo: si a determinada persona le gustan las manzanas dos veces más que las naranjas ($a_{1,2}=2$) y las naranjas 3 veces más que las bananas ($a_{2,3}=3$). Si a dicha persona le gustan las manzanas 6 veces más que las bananas [$a_{1,3}=6$], entonces la transitividad es respetada.

(2) $a_{i,j} = 1/a_{j,i}$

Ejemplo: si a una persona le gustan las manzanas dos veces más que las naranjas ($a_{1,2}=2$), entonces las naranjas le gustan la mitad que las manzanas ($a_{2,1}=1/2$).

Estas dos reglas implican diferentes tipos de comparaciones en la matriz de decisión.



■ Comparaciones sobre la diagonal principal (reflexividad). Se compara la alternativa consigo misma. El resultado es trivial.

 Comparaciones independientes. No están relacionadas con otras comparaciones. Por razones de practicidad, es mejor elegir la primer diagonal por sobre la diagonal principal para las comparaciones independientes.

 Comparaciones Transitivas. Se deducen a partir de los valores ingresados en la primer diagonal por sobre la diagonal principal.

 Comparaciones recíprocas. Se deducen usando la regla de reciprocidad.

5. Anexo tablas

Tabla 1

Matriz normalizada. Atributo Costo de obras

Matriz normalizada	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	TOTAL	vector de prioridades
Alt 1	0,73	0,78	0,78	0,58	2,88	0,72
Alt 2	0,08	0,09	0,09	0,17	0,42	0,11
Alt 3	0,08	0,09	0,09	0,17	0,42	0,11
Alt 4	0,1	0,04	0,04	0,08	0,27	0,07
Total					4	1

Tabla 2

Análisis de Consistencia. Atributo Costo de obras

	Consistencia	
	4,3	
	4,06	
	4,06	
	4,03	
N MAX	4,11	
índice de consistencia (IC)	0,04	
Ratio consistencia	0,04	< 0,1

Tabla 3

Comparaciones Pareadas. Atributo Riesgo de conflicto

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Alt 1	1	1/9	1/9	1/9
Alt 2	9	1	1	1
Alt 3	9	1	1	1
Alt 4	9	1	1	1
TOTAL	28,00	3,11	3,11	3,11
1/TOTAL	0,04	0,32	0,32	0,32

Tabla 4**Matriz normalizada.** Atributo Riesgo de conflicto

Matriz normalizada	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	TOTAL	vector de prioridades
Alt 1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,14	0,04
Alt 2	0,32	0,32	0,32	0,32	1,29	0,32
Alt 3	0,32	0,32	0,32	0,32	1,29	0,32
Alt 4	0,32	0,32	0,32	0,32	1,29	0,32
total					4,00	1,00

Tabla 5**Análisis de Consistencia.** Atributo Riesgo de conflicto

	CONSISTENCIA
	4,00
	4,00
	4,00
	4,00
N MAX	4,00
índice de consistencia (IC)	0,00
Ratio consistencia	0,00

< 0,1

Tabla 6**Comparaciones Pareadas.** Atributo Costos ambientales

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Alt 1	1	9	9	9
Alt 2	1/9	1	1	1
Alt 3	1/9	1	1	1
Alt 4	1/9	1	1	1
TOTAL	1,33	12,00	12,00	12,00
1/TOTAL	0,75	0,08	0,08	0,08

Tabla 7**Matriz normalizada.** Atributo Costos ambientales

Matriz normalizada	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	TOTAL	vector de prioridades
Alt 1	0,75	0,75	0,75	0,75	3,00	0,75
Alt 2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,08
Alt 3	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,08
Alt 4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,33	0,08
total					4,00	1,00

Tabla 8**Análisis de Consistencia.** Atributo Costos ambientales

	CONSISTENCIA
	4,00
	4,00
	4,00
	4,00
N MAX	4,00
índice de consistencia (IC)	0,00
Ratio consistencia	0,00

< 0,1

Tabla 9**Comparación de alternativas.** Atributo Superficie Recuperada

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
Coefficiente	-	0,3	0,7	1

Tabla 10**Comparaciones Pareadas.** Atributo Superficie Recuperada

	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4
Alt 1	1	1/3	1/7	1/9

Alt 2	3	1	1/3	1/5
Alt 3	7	3	1	1/3
Alt 4	9	5	3	1
TOTAL	20,00	9,33	4,48	1,64
1/TOTAL	0,05	0,11	0,22	0,61

Tabla 11

Matriz normalizada. Atributo Superficie Recuperada

Matriz normalizada	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	TOTAL	vector de prioridades
Alt 1	0,05	0,04	0,03	0,07	0,19	0,05
Alt 2	0,15	0,11	0,07	0,12	0,45	0,11
Alt 3	0,35	0,32	0,22	0,2	1,1	0,27
Alt 4	0,45	0,54	0,67	0,61	2,26	0,57
total					4	1

Tabla 12

Análisis de Consistencia. Atributo Superficie Recuperada

	CONSISTENCIA	
	IA	
	4,02	
	4,03	
	4,11	
	4,19	
N MAX	4,09	
índice de consistencia (IC)	0,03	
Ratio consistencia	0,03	< 0,1

Tabla 13

Vector de Prioridades correspondiente a cada Atributo.

	Vector: Atributo Costo de obras	Vector: Atributo Riesgo de conflicto	Vector: Atributo Costos ambientales	Vector: Atributo Superficie Recuperada
Alt 1	0,72	0,04	0,75	0,05
Alt 2	0,11	0,32	0,08	0,11
Alt 3	0,11	0,32	0,08	0,27
Alt 4	0,07	0,32	0,08	0,57

Tabla 14

Vector de Prioridades correspondiente a cada Criterio

vector de prioridades	
Económicos y Sociales (ES)	38%
Institucionales y de Gestión (IG)	12%
Ambientales (A)	38%
Técnico Hidráulicos (TH)	12%
total	100%

Tabla 15

Análisis de Sensibilidad. Asignación de Pesos equivalentes a cada criterio

Económicos y Sociales (ES)	25%
Institucionales y de Gestión (IG)	25%
Ambientales (A)	25%
Técnico Hidráulicos (TH)	25%
	100%

Tabla 16

Análisis de Sensibilidad. Asignación de Pesos de manera inversa a la asignación original a cada criterio

Económicos y Sociales (ES)	12%
Institucionales y de Gestión (IG)	38%
Ambientales (A)	12%
Técnico Hidráulicos (TH)	38%
	100%

6. Bibliografía Consultada

- 1- SAATY, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York 1980.
- 2- FREDES, MAGIORANO, SAN JUAN FIOL, FELICE, RODRIGUEZ. Métodos cuantitativos para la administración. Capítulo 7 Decisión Multicriterio. Facultad de Ciencias Económicas y Jurídicas – Universidad Nacional de La Pampa. Año 2007.
- 3- JOSÉ, LUIS ZANAZZI, Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty - Departamento Producción, Gestión y Medio Ambiente, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Universitas, Córdoba, Agosto 2003, pp. 148-170
- 4- TURÓN LANUZA, ALBERTO. Visualización de información en el proceso analítico jerárquico (AHP). Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza.
- 5- MARIO ALBERTO SALOMÓN, NELSON DARÍO SORIA Y RICARDO FERNÁNDEZ. Estudio de caso sitio piloto Mendoza, Departamento de Lavalle, marzo de 2005. Evaluación de degradación de tierras en zonas áridas proyecto. Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial. LADyOT – IADIZA - CRICYT. Mendoza, 2005.
- 6- JORGE PILAR, Modelo de optimización multiobjetivo utilizado como sistema de apoyo a la decisión en el proceso de otorgamiento de becas en las facultades de la Universidad Nacional del Nordeste. Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería Facultad de Ciencias Económicas.
- 7- SANTIAGO REYNA DOMÉNECH-FRANCISCO CARDELLS I ROMERO. Valoración AHP de los ecosistemas naturales de la Comunidad Valenciana. revista valenciana d ' estudis autonòmics número 27 - segundo trimestre de 1999.
- 8- LOREN TRIGO-SABATINO COSTANZO - DEA/AHP Como combinar dos metodologías de toma de decisiones. Estudio IESA Nro. 30.
- 9- MORENO JIMÉNEZ-ESCOBAR URMENETA. El pesar en el proceso analítico jerárquico. Departamento de Métodos Estadísticos. Universidad de Zaragoza.
- 10- JOSÉ MARÍA MORENO JIMÉNEZ, ALFREDO ALTUZARRA CASAS, M^a TERESA ESCOBAR URMENETA. El índice de consistencia geométrico para matrices incompletas en AHP Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza
- 11- MONDELO NEMESIO, SANCHEZ REBECA-CARRASQUERO NÉSTOR. El proceso analítico jerárquico como herramienta para la selección de la mejor ubicación de un relleno sanitario. Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela.