

## **Artículo: “Técnicas matemáticas utilizadas en la valoración económica ambiental. Un caso estudio”**

**Autoras:** Dra. Maritza Petersson Roldán \*

Dra. Mercedes Marrero Marrero \*\*

\* Departamento de Matemática - Facultad de Ingeniería Informática.  
Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos"

\*\* Departamento de Economía - Facultad de Industrial - Economía.  
Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos"

### **Resumen**

La matemática nacida en el intento de explorar las armonías y recurrencias del mundo físico se constituye como ciencia, aportando un método de pensamiento, que proporciona las herramientas que posibilitan el acceso del conocimiento humano a los fenómenos que son de interés al hombre. Es por ello que muchos campos del saber se interrelacionen estrechamente a la matemática, al proponerle nuevos retos que estimulan la elaboración de nuevas herramientas para su tratamiento. Las ciencias económicas es una de las beneficiadas con el herramental aportado por la matemática.

Los ejercicios de valoración económica ambiental exigen el uso de las técnicas matemáticas para llevar a vía de acción los métodos de valoración aportados por la teoría económica. En el presente trabajo se muestran diferentes herramientas matemáticas que auxilian las técnicas de valoración económica ambiental y se expone un caso estudio que hace uso de las técnicas multicriterio para la evaluación de alternativas de solución a un problema medioambiental.

### **Introducción**

La protección del medio ambiente constituye una de las tareas de mayor prioridad a escala mundial, justificado por el hecho de que la perpetuidad de la vida está sujeta a la existencia saludable del medio donde ella surge y se desarrolla. Múltiples son los temas debatidos acerca del deterioro ambiental y entre ellos los referidos a la disponibilidad de los recursos naturales, la cual peligra por la explotación inadecuada de los mismos que conlleva a su agotamiento y contaminación. El control, detención o reversión de los daños consecuentes de ese mal uso, tiene un costo económico que las sociedades deberán absorber en su proceso de desarrollo sustentable. Esto hace muy útil los análisis de valoración del medio ambiente y los recursos naturales, pues con ello es posible fundamentar las decisiones con respecto al manejo del ambiente y sus recursos. Estos análisis no deben realizarse desde una óptica reduccionista, considerando únicamente la dimensión económica, sino que debe incorporarse otras aristas, reconociéndose de ese modo el carácter plural del valor de la naturaleza.

Para lograr una correcta evaluación es necesario el uso de diferentes herramientas económicas y matemáticas que permitan considerar todas las dimensiones que los sistemas económicos- ecológicos contemplan.

### **Desarrollo**

El proceso de toma de decisiones que involucra el medio ambiente y su calidad, requiere de análisis económicos de evaluación de proyectos. Generalmente estos análisis se realizan con dos criterios económicos: costo - efectividad o costo - beneficio.

Análisis costo - efectividad: Este es simplemente un análisis en el cual se observa la manera más económica de lograr un objetivo determinado de calidad ambiental o,

expresándolo en términos equivalentes, de lograr el máximo mejoramiento de cierto objetivo ambiental para un gasto determinado de recursos. Aquí sólo interesan los costos para alcanzar una determinada meta ambiental.

Análisis costo – beneficio: En este tipo de análisis, como su nombre lo indica, los beneficios de la acción propuesta se calculan y comparan con los costos totales que asumiría la sociedad si se llevara a cabo dicha acción.

Para la estimación de los beneficios y costos es necesario utilizar los métodos de valoración de activos ambientales, los cuales tienen sus fundamentos económicos en la teoría del consumidor, específicamente en el concepto de excedente del consumidor, el cual se define en la literatura (Baumol, 1980) como la diferencia entre lo que el consumidor hubiera estado dispuesto a pagar por un determinado nivel de consumo (utilidad total por su compra), menos lo que realmente paga por dicho nivel de consumo. Esto puede ser representado como el área sombreada en el siguiente gráfico:

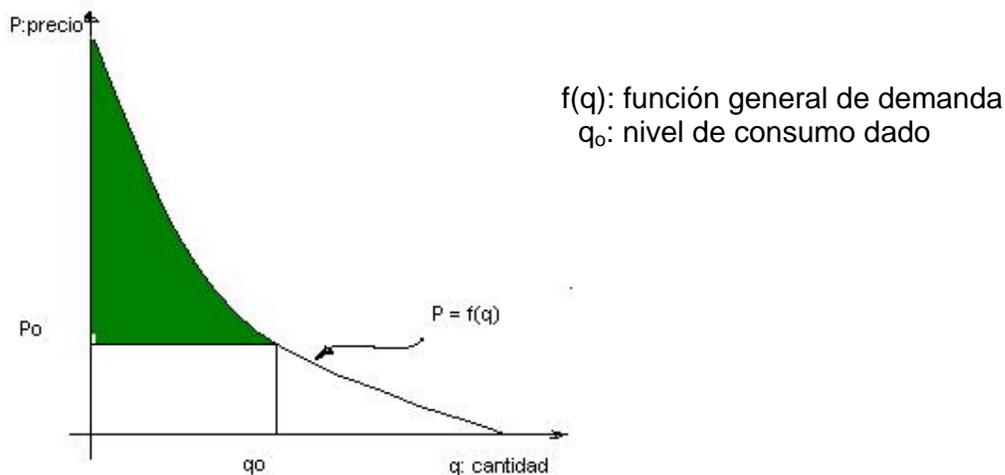


Fig. 1. Excedente del consumidor

Análiticamente, el excedente del consumidor queda definido como:

$$\int_0^{q_0} f(q) dq - P_0 q_0$$

Sólo bajo ciertas condiciones, el excedente del consumidor puede ser utilizado como indicador de las ganancias y pérdidas del bienestar asociado a un cambio de precio, por lo que se propone el uso de otros dos conceptos:

VC: Variación compensatoria: Indica el deseo de pagar una cantidad de dinero para asegurar un beneficio (mejora ambiental) o evitar una pérdida (daño ambiental)

VE: Variación equivalente: Indica el deseo de aceptar una determinada cantidad de dinero por tolerar una pérdida (daño ambiental) o renunciar a un beneficio (mejora ambiental).

El hecho de la no existencia de mercados reales para los beneficios y daños ambientales impide la medición del excedente del consumidor, indicador monetario que representa el incremento del bienestar social derivado de una mejora (daño) ambiental. Es por ello que se han ideado métodos que trabajan en muchos casos en mercados contruados o con existentes, donde se revela de manera indirecta la voluntad de pagar del consumidor. La

aplicación de estos métodos exige la utilización de herramientas matemáticas que posibilitan tales estimaciones.

En el caso del método de variables hedónicas, donde se trata de determinar en qué medida el deseo de consumir un bien ambiental o de garantizar un nivel de calidad en dicho bien, afecta el precio de una serie de bienes para los que existe un mercado real. El valor de un bien con mercado está condicionado por una serie de variables, llamadas económicas y una variable ambiental, llamada hedónica. El método consiste en determinar el deseo de pagar por un cambio en la calidad del bien ambiental a partir de una función  $P$  estimada, que relaciona el bien con mercado y las variables económicas y la ambiental.

Sea  $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n, z)$  obtenida por regresión estadística a partir de una muestra seleccionada, donde:

$x_i$ : variables económicas

$z$ : variable ambiental

Se define  $W$ , deseo marginal de pagar, como:

$$W(z) = \frac{\partial P}{\partial z} \quad 1.1$$

Si la función  $P$  no es separable entre las variables económicas y la variable ambiental, implicará que  $W$  dependerá además de la variable ambiental de algunas de las de tipo económica, en ese caso para lograr que  $W$  solo dependa de  $z$ , se procederá a evaluar la muestra tomada en la función obtenida en 1.1, obteniéndose una nueva muestra  $(W_i, z)$ , con la que se realizará un ajuste estadístico que permitirá obtener  $W(z)$ .

El deseo total de pagar será:

$$\int_{z_1}^{z_0} W(z) dz \quad \begin{array}{l} z_0: \text{valor inicial de la variable anterior} \\ z_1: \text{valor alcanzado después del} \end{array}$$

Cuando se aplica el método de costo de viaje, se estima la voluntad de pagar por el disfrute de un servicio ambiental, especialmente de carácter recreativo, a partir de la función de demanda obtenida, al relacionar el costo de desplazamiento al lugar y el número de visitantes. Para la obtención de esta función se utilizan técnicas de regresión lineal y puede ser considerado en el análisis otras variables que contemplen características socioeconómicas de los visitantes y otros atributos propios del entorno. Al conocer esta función es muy simple la estimación del excedente del consumidor, determinando el área bajo la curva de demanda estimada.

El método de valoración contingente, el cual clasifica como método de valoración directo, al tratar de estimar la voluntad de pagar por mejoras ambientales en mercados construidos artificialmente, en los que el papel del mercado lo juega un entrevistador y el de la oferta las personas que disfrutan el bien o sufren el daño ambiental, es otro ejemplo donde las técnicas de la estadística matemática son el medio de lograr la materialización de la valoración en la práctica.

La manera en que puede presentarse el cuestionario cambia según la metodología seguida por el entrevistador: encuesta cerradas, abiertas, por subasta, por referéndum. Para todas, el procesamiento de la información requiere del uso de métodos estadísticos, los cuales permiten estimar la variación compensatoria o equivalente, según sea el caso.

Los métodos mencionados son capaces de asignar un indicador monetario al valor que se está estimando, lo cual demuestra la importancia del medio ambiente al bienestar de la

sociedad, no queriendo decir que esa valoración deba ser vista como de mercado (Azqueta, 1994).

El enfoque más utilizado para la valoración económica ambiental es el costo - beneficio convirtiéndose en un instrumento de decisión que utiliza las preferencias individuales de las partes implicadas en el proyecto, donde los beneficios son vistos como preferencias satisfechas y los costos como las no satisfechas. Estas preferencias son agregadas sobre la base de la eficiencia y el criterio básico de Pareto.

Este método parte del principio que existe una única medida que clasifica todos los objetos y situaciones, considerando la existencia de una sola medida del valor, o sea, parte de la idea de la conmensurabilidad del valor. (Martínez Alier, 1995)

Uno de los riesgos que se corre con el uso de este método es que la tendencia a cuantificar los efectos sobreenfatice aquellos que son valorizables, aún cuando otros efectos intangibles no cuantificados pueden ser tanto o más importantes.

Es conocida la naturaleza inconmensurable y multidimensional del medio ambiente, lo que hace cuestionable la utilización del análisis costo beneficio para una evaluación integrada, la cual debe basarse en procedimientos que explícitamente requieren integrar diferentes cosmovisiones, muchas de ellas contradictorias.

Lo planteado propone la utilización de enfoques alternativos a los mencionados, los cuales se sostienen bajo la perspectiva de un análisis multicriterio.

El análisis multicriterio busca integrar las diferentes dimensiones de una realidad en un solo marco de análisis para dar una visión integral y de esta manera tener un mejor acercamiento a la realidad.

En principio, el análisis multicriterio es una herramienta adecuada para tomar decisiones que incluyen conflictos sociales, económicos y objetivos de conservación del medio ambiente, y además, cuando confluyen una pluralidad de escalas de medición (físicas, monetarias, cualitativas, etc.).

La mayor ventaja de los métodos multicriterio es que permiten considerar un amplio número de datos, relaciones y objetivos, que generalmente están presentes en un problema de decisión, de tal modo que el problema de decisión a manejar, puede ser estudiado de una manera multidimensional. Por otra parte, el análisis multicriterio incluye, en sus características, la posibilidad de trabajar con márgenes de incertidumbre.

Matemáticamente, el problema multicriterio se define:

$$\text{Max} F(x)$$

$$x \in X$$

donde:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  es el vector de  $n$  variables de decisión

$X \subset R^n$  es la región factible

$F(x) = [f_1(x), \dots, f_p(x)]$  es el vector de las  $p$  funciones objetivos

El problema consiste en determinar valores para las variables  $x_j$ , que den el mejor valor a las  $p$  funciones objetivos, estas funciones están generalmente en conflicto, por tanto, será imposible encontrar una solución que maximice simultáneamente todos los objetivos propuestos, lo que obliga a sustituir el concepto de solución óptima por el de solución de compromiso.

La toma de decisiones multicriterio ha desarrollado una personalidad propia que utiliza una terminología específica que incluye conceptos nuevos. Debe observarse que algunos de estos conceptos tienen el mismo significado semántico y se emplea uno u otro en dependencia del contexto teórico en el que se utilicen; a continuación se definen los mismos:

- Alternativas: Posibles soluciones o acciones a tomar por el decisor.
- Atributos: Características que se utilizan para describir cada una de las alternativas disponibles, pueden ser cuantitativas o cualitativas, cada alternativa puede ser caracterizada por un número de atributos escogidos por el decisor.
- Objetivos: Aspiraciones que indican direcciones de perfeccionamiento de los atributos seleccionados, está asociado con los deseos y preferencias del decisor.
- Meta: Aspiraciones que especifican niveles de deseos de los atributos.
- Criterio: Término general que engloba los conceptos de: atributos, objetivos y metas que se consideran relevantes en un problema de decisión.

Atendiendo a la naturaleza de la región factible  $X$ , las decisiones multicriterio se dividen en dos grandes ramas:

- Múltiples Objetivos ( MODM ) se relaciona con aquellos problemas en que el conjunto de alternativas es grande y no predeterminadas, se utilizan para diseñar la " mejor " alternativa considerando la interacción con las restricciones, la solución de estos problemas se aborda mediante las técnicas clásicas de optimización.

- Múltiples Atributos ( MADM ) o métodos discretos, aquí se consideran un número finito de alternativas , de manera que el problema queda definido de la siguiente forma:

$A$  es un conjunto finito de  $n$  alternativas

$m$  es el número de criterios de valoración  $g_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )

Dadas la alternativas  $a, b \in A$ , se considera  $a$  mejor que la alternativa  $b$ , según el  $i$ -ésimo criterio si  $g_i(a) > g_i(b)$ . Este problema puede representarse en forma tabular o de matriz  $C(n \times m)$ , llamada matriz de evaluación o de impacto, donde el elemento  $c_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ) representa la valoración de la  $j$ -ésima alternativa según el  $i$ -ésimo criterio. La matriz de impacto puede incluir información cuantitativa, cualitativa o ambos tipos de información.

Existen varios tipos de formulación de problemas multicriterio de tipo discreto, que conllevan a varios tipos de resultados, que pueden ser:

$\alpha$ : la meta es identificar una y sólo una alternativa final (seleccionar la mejor alternativa).

$\beta$ : la meta es asignar cada acción a una categoría predeterminada (clasificar las alternativas en clases predeterminadas).

$\gamma$ : la meta es clasificar todas las alternativas según un orden total o parcial.

$\delta$ : la meta es describir alternativas relevantes y sus consecuencias.

#### Los métodos multicriterio discretos.

Los métodos multicriterio discretos se enmarcan dentro de diferentes enfoques los cuales difieren según los supuestos y los principios elegidos en cada una de las fases de evaluación, que se enumeran a continuación:

- Definición del problema.
- Definición de una serie de criterios de evaluación.
- Identificación del sistema de preferencia del centro decisor.
- Elección de un método de agregación.

Definición del problema.

Los resultados de cualquier modelo de decisión depende en gran medida de la información disponible, a su vez esa información depende de la fase de formulación y definición del problema. Por ello, la fase de definición del problema y la elección del tipo de modelo están estrechamente interrelacionadas.

#### Definición de criterios

En esta fase compiten dos tendencias opuestas: por un lado, el aumento del número de criterios para construir un modelo más realista y por otro lado, la utilización de un número limitado de criterios, para que el modelo sea más sencillo y fácil de aplicar. En general, el conjunto de criterios debe tener dos cualidades: (Munda, 1997)

- Legibilidad: Un número suficientemente pequeño de criterios para ser base de una discusión.
- Operabilidad: Todos los actores deben considerar a la familia de criterios como una base sólida para la evaluación.

#### Identificación del sistema de preferencia del centro decisor.

Las preferencias son incluidas en el modelo, a través de procesos de ponderación de criterios. Según el marco en que los pesos de criterios sean utilizados, ellos representaran en algunas ocasiones la importancia relativa entre criterios y en otras situaciones serán factores de escala cuyo significado estará asociado a un ratio de equilibrio. Existen varios métodos para determinar las prioridades de los decisores en la forma de índices de ponderación:

- Estimación directa de los índices de ponderación: método de la tasa de intercambio (trade-off), método de puntuación, método de clasificación, declaraciones orales, comparación dos a dos.
- Estimación indirecta: Se basa en elecciones pasadas, en la clasificación de alternativas, estimación interactiva de pesos.

#### Procedimiento de agregación.

Es esta la fase que genera mayor diversidad de enfoques en el análisis multicriterio. La agregación de las evaluaciones de las alternativas expresadas acorde diferentes criterios implica algún tipo de compensación. Es por ello que los métodos multicriterio, considerando la lógica de compensación adoptada, puedan ser clasificados en: (Guitouni y Martel, 1998)

- No compensatorios. Ninguna compensación entre las evaluaciones de los criterios es admitida. El método lexicográfico es un ejemplo de este enfoque, el mismo consiste en ordenar las alternativas según el orden de importancia estricta previamente declarado por el decisor. O sea, si el decisor ordena  $m$  criterios  $g$  de la siguiente manera:  $g_1 > \dots > g_i > \dots > g_m$ , donde  $g_1$  es el criterio de mayor importancia, todas las alternativas son ordenadas según el criterio  $g_1$ , si existen alternativas indiferentes, estas son examinadas según el segundo criterio y así sucesivamente.
- Compensatorios. En este caso se admite una compensación absoluta entre las diferentes evaluaciones. Por tanto, una buena evaluación en un criterio puede fácilmente contrarrestar un resultado pobre en otro. En este grupo pueden ubicarse los métodos con el enfoque de la teoría de la utilidad multiatributo (TUMA) y el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).
- Parcialmente compensatorios. En este caso, algún tipo de compensación es aceptada. Clasifican en este grupo los métodos de superación. Aquí se encuentra la familia de los

ELECTRE, la familia PROMETHEE, el Melchor, el Oreste, el NAIADE, entre otros (Munda, 1997)

La decisión de qué método multicriterio utilizar ante una situación, es un problema multicriterio en si mismo, pues esta decisión debe ser tomada considerando un conjunto de atributos como son:

- Información disponible en término de su calidad, cantidad y otras características de la misma.
- Objetivos propuestos con el análisis.
- Tiempo para procesar la información.
- Disponibilidad de software para la búsqueda de la solución.
- Estructura del problema, lo cual puede discriminar el uso de determinada técnica.
- Conocimiento del especialista de las técnicas multicriterio.

Además de lo dicho, vale señalar que la efectividad de la aplicación de estos métodos depende del contexto. El caso que se muestra a continuación, el interés está en seleccionar la mejor alternativa de reducción de contaminación a la bahía de Cárdenas, donde la información que se dispone es incierta en determinados renglones, como por ejemplo, la respuesta de la bahía ante la reducción de diferentes niveles de contaminación, además que algunos resultados de las acciones no es posible medirlos en términos monetarios, todo ello obliga a pensar en métodos consistentes con estas características.

#### Exposición del caso estudio. Evaluación de alternativas de reducción de contaminación.

El objetivo de este análisis está en la disminución de los niveles de contaminación orgánica en el litoral de la ciudad de Cárdenas y a su vez contribuir al mejoramiento de la calidad de las aguas de la playa. Por tanto las alternativas de reducción generadas estarán dadas por acciones a acometer en las fuentes de contaminación puntuales que inciden directamente en la zona.

#### **Definición de las alternativas de reducción.**

Analicemos las posibilidades de cada una de las entidades contaminadoras de reducir su carga a la bahía antes de definir las alternativas.

- Procesadora de langosta

Los residuales líquidos con una alta concentración orgánica de esta empresa son vertidos, actualmente, directamente al mar, como consecuencia de no disponer de una bomba de expulsión que los traslade a la laguna de oxidación "13 de Marzo". Por tanto la acción recomendada para resolver el mencionado problema es la compra y puesta en explotación de una bomba, además de la reparación de las tuberías de impulsión.

Estas acciones permitirán que la empresa deje de verter directamente a la bahía las 30 t de DBO generada por ella cada año.

- Combinado lácteo.

Este Combinado posee dos establecimientos ubicados: uno en la ciudad a solo 1.5 Km de la bahía (fábrica de helado) y el otro a las afuera de la misma. Las producciones lácteas son altas consumidoras de agua, por lo que generan grandes volúmenes de residuales líquidos; en la actualidad estos son vertidos a pozos de infiltración, que en opinión de experto, impactan las aguas del litoral de la ciudad por su cercanía a la bahía y las características del terreno de la zona.

Los directivos del combinado lácteo plantean la necesidad de un redimensionamiento de la fábrica de helado, por lo que proponen mudarla al otro establecimiento, que posee la infraestructura suficiente para absolverlos, además de disponer de una planta de

tratamiento en desuso por encontrarse deteriorada, la cual, si es recuperada, podrá tratar los residuales de la fábrica aumentada. Por tanto la acción propuesta implica: mudar la fábrica de helado (desinstalación y reinstalación en el nuevo lugar) y reparar la planta de tratamiento.

Estas acciones condicionarán la reducción del aporte anual de DBO de esta empresa a la bahía en un 75 %, lo que significa una disminución en 48 t/año de DBO.

- La laguna "13 de Marzo"

Asimila los residuales del reparto de su mismo nombre. Dada las condiciones de deterioro que presenta, se considera que tiene una eficiencia por debajo del 30%; la acción recomendada es su recuperación.

Estas acciones lograrán que la laguna trabaje al menos a un 80%, lo que significa una reducción de 51 t/año de DBO.

En el caso de la carga aportada por los residuales de la ciudad, se propone la construcción del alcantarillado, lo cual garantizará una reducción de 585 t/año de DBO de la carga a la bahía.

Analizadas las posibles acciones a acometer se definieron las siguientes alternativas:

A1: Las acciones en la procesadora de langosta más la recuperación de la laguna "13 de Marzo" y las acciones en el combinado lácteo.

A2: La construcción del alcantarillado de la ciudad.

A3: A1 + A2

### **Definición de los criterios para la valoración de las alternativas.**

El objetivo de todas las alternativas definidas debe ser mejorar la calidad de las aguas del litoral de la ciudad de Cárdenas, considerando que cualquier reducción de la carga favorece el mejoramiento de las mismas, por tanto, los criterios de evaluación para el análisis deberán responder a ese objetivo general y concentrarse en la evaluación de los costos y/o beneficios (económicos, sociales y ambientales) con que las alternativas logran el mencionado objetivo. Con esa idea se definen los siguientes criterios:

- Económicos:
  - Beneficios
  - Costo de la inversión/total mitigado
  - Propicia el desarrollo de actividades turísticas recreativas
- Ambientales:
  - Reduce otros contaminantes
  - Reducción total
  - Incidencia sobre la biodiversidad en la bahía
  - Mejora ambiental en el lugar
- Sociales:
  - Incidencia en la imagen del lugar
  - Incidencia en el paisaje de la ciudad
  - Efecto educacional

Beneficios. Este criterio, expresado en unidades monetarias por año, indica cuánto se ingresaría por la disminución de los niveles de contaminación, lo cual fue obtenido en la valoración económica del efecto de la contaminación sobre algunos de los bienes y servicios ofertados por la bahía, multiplicado por un índice que expresa el mejoramiento de la bahía.

Costo de la inversión/total mitigado. La Alternativa # 1 tiene implicado acciones en tres fuentes puntuales de contaminación, por tanto el costo de la misma es la suma de los

costos en cada una y el total mitigado es la suma de lo que mitiga cada una de las acciones, al igual que la alternativa tres que contempla dos acciones, su costo será la suma de los costos de ambas y el total mitigado la suma de lo que mitiga cada una.

Propicia el desarrollo de actividades turísticas recreativas. Las condiciones actuales de la playa no permiten su uso como lugar para desarrollar actividades turísticas recreativas, las cuales reportan beneficio a los ciudadanos de Cárdenas.

Cada una de las alternativas a evaluar, dado por el posible efecto que provocará sobre la calidad de las aguas del litoral, propiciará el desempeño de actividades recreativas en el lugar. Es conocido que el uso del agua con fines recreacionales puede revestir dos formas: con contacto directo o primario y con contacto indirecto o secundario, para lo cual es necesario el cumplimiento de determinados requerimientos.

Por tanto la evaluación de cómo cada alternativa propicia el desarrollo de actividades recreativas, estará dada en nivel en que garantizan esos requerimientos, considerando que las actividades que implican un contacto directo con el agua, son más exigentes en los mismos.

Este criterio se evaluará cualitativamente, considerando que una alternativa será buena propiciadora de actividades recreativas, si posibilita actividades recreativas de uso directo del agua, será moderadamente buena si solo posibilita el uso indirecto y mala sino posibilita el uso indirecto.

Reduce otros contaminantes. Este criterio se declaró de tipo cualitativo y tiene en cuenta para su evaluación las características de los residuales tratados, así como su efectividad en otros indicadores químico-bacteriológicos de la calidad del agua.

Reducción total. Este indicador muestra el total de DBO disminuido por cada alternativa, dado en toneladas al año.

Incidencia sobre la biodiversidad en la bahía. Al ser reconocido por los expertos la alta sensibilidad de la biodiversidad a la presencia de contaminantes en la bahía, es evidente que el efecto sobre la misma será positivo en la medida que disminuyan los niveles de contaminación, sin embargo existe mucha incertidumbre alrededor de la magnitud de la respuesta ante la reducción de la carga, por lo que se decidió medir este criterio a través del índice de mejora de calidad determinado en la evaluación del primer criterio, pero como un número borroso.

Mejora ambiental en el lugar. Este criterio será de tipo cualitativo y el mismo estima la incidencia de la alternativa adoptada en el lugar donde se implementa.

Incidencia en la imagen del lugar. En este criterio de tipo cualitativo se tendrá en cuenta la contribución de la acción en la imagen competitiva de la empresa que la acomete, además del efecto en la imagen paisajística.

Incidencia en el paisaje de la ciudad. Este criterio evalúa las alternativas considerando como ellas contribuyen a una mejor imagen de la ciudad.

Efecto educacional. Uno de los valores reconocidos a la bahía es la de propiciar la obtención de información científica-educativa, al posibilitar a los ciudadanos de Cárdenas estar en contacto con el medio marino, aprender sobre sus ecosistemas y sobre las actividades históricas desarrolladas en el lugar. La gestión que se haga para que las aguas de la bahía presenten la calidad requerida, será un mensaje positivo que incidirá en la conciencia ambiental de los habitantes del lugar, demostrando que acciones acometidas en

las industrias de su localidad posibilitan tener un ambiente más saludable, comprometiéndolos en la indispensable lucha por la preservación del medio ambiente.

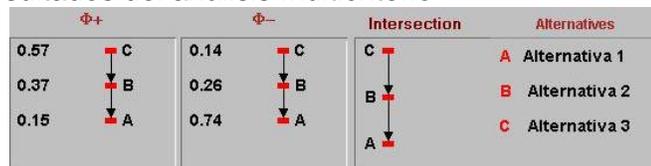
Aplicación del proceso de agregación de criterios del NAIADE.

Las valoraciones de las alternativas según todos los criterios definen la siguiente matriz:

Matrix type	Impact	Case Study		
		Bahía de Cárdenas		
Criterios	Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	Beneficio		44800	207200
costo/mitigado		14475.7	29743.6	44189.3
propic actv turística		Mala	Buena	Buena
reduce otros cont.		Buena	Buena	Muy Buena
reduccion total		122	585	707
incidencia biodiversidad		Aprox{0.08}	Aprox{0.37}	Aprox{0.93}
Mejora Ambiental		Buena	Muy buena	Excelente
Imagen del lugar		Muy Buena	Buena	Muy Buena
Paisaje ciudad		Moderado	Muy Bueno	Muy Bueno
Efecto Educacional		Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno

El análisis multicriterio con el modelo NAIADE de los datos de dicha matriz ha generado los resultados que se muestran en la siguiente figura:

Resultados del análisis multicriterio



La alternativa preferida según el análisis realizado es la tercera o sea la que implica todas las acciones. Esta alternativa es la más costosa sin embargo resultó la preferida, lo cual puede ser explicado por el hecho de que muchos criterios de tipo ambiental y social definidos, le favorecen. El ordenamiento completo es el siguiente:

1. Construcción del alcantarillado de la ciudad y realización de las acciones en cada una de las fuentes contaminantes consideradas.
2. Construcción del alcantarillado de la ciudad.
3. Las acciones en cada una de las fuentes contaminadoras consideradas.

Para analizar la robustez de los resultados obtenidos (Munda,G. y otros, 2003) se recomienda variar el parámetro  $\alpha$  (requerimiento mínimo para las relaciones borrosas) y el operador de agregación utilizado, que condiciona el nivel de compensabilidad permitido. A continuación se muestran los resultados con diferentes combinaciones de parámetros y operadores:

Ordenamiento de las alternativas para diferentes combinaciones de parámetros y operadores de agregación

	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.8$
Operador mínimo			

<p>Operador Zimmermann- Zysno <math>\gamma =</math> 0:5</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.50 C 0.40 C C 0.46 B 0.41 B B 0.40 A 0.55 A A</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.33 C 0.28 C C 0.32 B 0.28 B B 0.28 A 0.37 A A</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.19 C 0.17 C C 0.19 B 0.18 B B 0.17 A 0.20 A A</p>
<p>Simple Producto</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.24 C 0.16 C C 0.21 B 0.17 B B 0.16 A 0.29 A A</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.11 C 0.08 C C 0.10 B 0.08 B B 0.08 A 0.14 A A</p>	<p><math>\phi^+</math> <math>\phi^-</math> <i>Intersection</i></p> <p>0.04 C 0.03 C C 0.03 B 0.03 B B 0.03 A 0.04 A A</p>

Como puede apreciarse en la tabla anterior, las variaciones en el nivel de compensación y en el parámetro  $\alpha$  no varían el ordenamiento de las alternativas, por lo que los resultados son poco sensibles a los cambios realizados, demostrándose su robustez.

Es bueno aclarar que los resultados del análisis multicriterio son de ayuda a la toma de decisión al mostrar las ventajas y desventajas de cada acción, además de brindar transparencia al proceso, cuando permite valorar los cambios en los resultados ante diferentes políticas en la selección de los parámetros; por tanto sus salidas deben ser interpretadas de ese modo, quien toma la decisión son las partes implicadas en el proceso (decision-maker).

### Conclusiones.

Se demuestra la necesidad y factibilidad del uso de métodos cuantitativos en la medición económica del efecto de la contaminación ambiental.

Los análisis económicos para la evaluación ambiental bajo criterios puramente económicos resultan, generalmente, incompetentes al tratar de fundamentar las decisiones relativas a la problemática medioambiental.

Es por ello, que las técnicas de evaluación multicriterio se constituyen como la herramienta más adecuada para el tratamiento de la mencionada problemática, donde es imprescindible una visión que abarque todas las dimensiones que la enmarquen.

El método NAIADE es un método muy apropiado para la evaluación de las alternativas, considerando su capacidad de tratar información de tipo mixto, cuantitativo y cualitativa, y la incertidumbre de la información. En el presente trabajo se mostró la efectividad de este método en la evaluación de alternativas de reducción de contaminación a la bahía de Cárdenas desde una visión integradora de las dimensiones ambiental, económica y social.

### Bibliografía:

1. Barba-Romero, S. (1996). Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica. Servicio de Publicaciones de la U.A.H. Alcalá de Hinaris. Madrid.
2. Gonzáles, Yani (1999). Estudio ecológico de la bahía de Cárdenas. Trabajo Diploma.
3. Guitouni, A. Y Martel J.M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research 109. 501-521.
4. Informe parcial Cimab (Centro de Ingeniería y manejo ambiental de Bahía y Costas) . (2001). Diagnóstico de la calidad ambiental del ecosistema de la zona Varadero-Cárdenas. Ciudad de La Habana.
5. Martínez Alier, Joan.(1995). Curso Básico de Economía Ecológica Publicado por la Oficina Regional para América Latina y el Caribe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México.

6. Munda, Guiseppe., Martínez Alier, J. (1997). Environmental Policy Under Conditions of Complexity. European Environmental Agency.
7. Munda G. (1997) Teoría de Evaluación Multicriterio: Una breve perspectiva general. Bellaterra. España.
8. Munda, G. (2004). Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación Social de las Políticas Públicas. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica Vol.1: 31-45
9. G. Munda, G. Gamboa, D. Russi, E. Garmendia (2003) Social Multi-Criteria Evaluation of Renewable Energy Sources: Two Real World Catalan Examples. Report for the research project "Development and Application of a Multicriteria Decision Analysis software Tool for Renewable Energy sources (MCDA-RES)", Contract NNE5- 2001-273.
10. Munda G. Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development. En J. Figueira, S. Greco and M. Ehrgott (eds.) – State of the art of multiple-criteria decision analysis, Kluwer, Dordrecht.
11. Munda G. and Nardo M. (2003). Mathematical modelling of composite indicators for ranking countries. Proceedings of the First OECD/JRC Workshop on Composite Indicators of Country Performance, JRC,Ispra, disponible en: [http://webfarm.jrc.cec.eu.int/uasa/events/oecd\\_12may03/Background/](http://webfarm.jrc.cec.eu.int/uasa/events/oecd_12may03/Background/).
12. Saaty T. (1995). Decisión making for leaders: The analytic herarchy process for decisión in complex world. RNS Publications. Pittsburg.USA.
13. Saaty T. (1980). The analytic Hierarchy Process. McGrawHill.