

Capítulo 3. Metodologías de evaluación del impacto ambiental

3.1 Evaluación del Impacto Ambiental

Numerosos tipos de métodos han sido desarrollados y usados en el proceso de evaluación del impacto ambiental (EIA) de proyectos. Sin embargo, ningún tipo de método por sí sólo, puede ser usado para satisfacer la variedad y tipo de actividades que intervienen en un estudio de impacto, por lo tanto, el tema clave está en seleccionar adecuadamente los métodos más apropiados para las necesidades específicas de cada estudio de impacto.

Los métodos más usados, tienden a ser los más sencillos, incluyendo analogías, listas de verificación, opiniones de expertos (dictámenes profesionales), cálculos de balance de masa y matrices, etc.. Aún más, los métodos de *evaluación de impacto ambiental* (EIA) pueden no tener aplicabilidad uniforme en todos los países debido a diferencias en su legislación, marco de procedimientos, datos de referencia, estándares ambientales y programas de administración ambiental.

Las características deseables en los métodos que se adopten comprenden los siguientes aspectos:

1. Deben ser adecuados a las tareas que hay que realizar como la identificación de impactos o la comparación de opciones.
2. Ser lo suficientemente independientes de los puntos de vista personales del equipo evaluador y sus sesgos.
3. Ser económicos en términos de costes y requerimiento de datos, tiempo de aplicación, cantidad y tiempo de personal, equipo e instalaciones.

Las metodologías no proporcionan respuestas completas a todas las preguntas sobre los impactos de un posible proyecto o conjunto de alternativas ni son libros de cocina que conduzcan a un fin con solo seguir las indicaciones. Además que deben seleccionarse a partir de una valoración apropiada producto de la experiencia profesional y con la aplicación continuada de juicio crítico sobre los insumos de datos y el análisis e interpretación de resultados. Uno de sus propósitos es asegurar que se han incluido en el estudio todos los factores ambientales pertinentes.

Una de las primeras clasificaciones hecha por Warner y Bromley en 1974 relaciona los métodos en cinco grupos:

1. Métodos "ad hoc".
2. Técnicas gráficas mediante mapas y superposiciones.
3. Listas de chequeo.
4. Matrices.
5. Diagramas.

Canter y Sadler (1997) clasificaron las metodologías para la evaluación de impacto ambiental en veintidós grupos listados alfabéticamente y no en orden de importancia o de uso, los cuales se describen a continuación:

(1) Analógicos. Básicamente se remite a la información de proyectos existentes de un tipo similar al que está siendo analizado por un estudio de impacto. La información obtenida en la medición y seguimiento de los impactos ambientales actuales puede ser usada como una analogía a los impactos anticipados del proyecto propuesto. Además de que, clases similares de proyectos se pueden utilizar para un programa de

seguimiento que desarrolle información sobre la huella del impacto de un proyecto propuesto.

(2) **Listas de chequeo.** Hay muchas variedades de **listas de chequeo**, este tipo de metodología es la más frecuentemente utilizada en los procesos de EIA. Típicamente, la lista de chequeo contiene una serie de puntos, asuntos de impacto o cuestiones que el usuario atenderá o contestará como parte del estudio de impacto. Tales listas de chequeo representan recordatorios útiles para identificar impactos y proporcionar una base sistemática y reproducible para el proceso de EIA.

(3) **Listas de chequeo enfocadas a decisiones**, representan un grupo de métodos los cuales están inicialmente referidas a comparar alternativas y conducir a un análisis de equilibrio. En este considerando, tales métodos son inicialmente útiles para la síntesis de información de estudios de impacto. Cada alternativa viable está sujeta a estudio. El proceso de EIA consistiría de una fase de análisis y una fase de síntesis, las listas de chequeo para decisiones pueden ser útiles para ambas fases, con particular valor asociado a la fase de síntesis. Hay varios tipos listas de chequeo para decisiones y está fuera del alcance de este trabajo resumir completamente todos los tipos.

(4) **Análisis ambiental coste-beneficio** (Environmental Cost-Benefit Analysis ECBA). Este método complementa el tradicional análisis de coste-beneficio con una atención adicional a los recursos naturales y su valor económico. Su aplicación a la evaluación económica de impactos específicos de un proyecto propuesto y alternativos tiene considerables limitaciones. Las técnicas de estimación varían en complejidad y alcance, pero han tenido una considerable demanda entre los profesionales y usuarios de tales estudios (Azqueta, 1994).

(5) **Opinión de expertos**, el cual también puede ser referido como **Dictamen Profesional**, representa un tipo ampliamente usado de métodos dentro del proceso de evaluación de impacto ambiental. Este método se utiliza normalmente para señalar los impactos específicos de un proyecto sobre los diferentes componentes medioambientales. Las herramientas específicas dentro de la categoría de **opinión de expertos** que pueden utilizarse para delinear información, incluyen estudios Delphi y

el uso del proceso adaptativo de evaluación ambiental. Con este enfoque los grupos de expertos identifican la información apropiada y elaboran modelos cualitativos/cuantitativos para la predicción de impactos o para simular procesos medioambientales.

(6) **Sistemas Expertos.** Consiste en recoger el conocimiento profesional y el juicio de expertos en áreas temáticas específicas y de actualidad. Tal conocimiento es codificado, a través de una serie de reglas o experiencias prácticas (heurísticas), en entornos de sistemas informáticos computacionales. Los **Sistemas Expertos** son típicamente amigables al usuario y sólo requieren la respuesta a una serie de preguntas para conducir a un análisis particular. Se está incrementando la atención al desarrollo de **sistemas expertos** más exhaustivos para los procesos de EIA

(7) **Índices o indicadores.** Se refiere a características específicas o integradas de factores medioambientales o recursos. Se utilizan dentro de los estudios de impacto para representar parámetros de amplitud de medios o recursos. Específicamente, los **índices** se refieren a información numérica o bien información catalogada. Se usa como sistema auxiliar para describir los ambientes afectados así como para la predicción y evaluación de impactos. Los **índices** numéricos o descriptivos se han desarrollado como una medida de la vulnerabilidad del medio ambiente y los recursos a la contaminación u otras acciones humanas y han probado su utilidad en la comparación de localizaciones para una actividad propuesta. Sobre estas bases, pueden ser formuladas las medidas para minimizar los impactos ambientales e incluir controles.

(8) **Pruebas de Laboratorio y Modelos a Escala.** Se pueden aplicar para conseguir información cualitativa / cuantitativa sobre impactos anticipados de un determinado tipo de proyecto en una localización geográfica dada. Aunque este tipo de métodos no han sido extensamente usados son apropiados para ciertos proyectos.

(9) **Evaluación de Paisajes.** Son inicialmente útiles para la valoración de recursos estéticos o visuales. Tales métodos están basados típicamente en el desarrollo de información derivada de una serie de indicadores y la subsiguiente adición de dicha información sobre una puntuación global o índice para el escenario ambiental. Esta

información puede ser usada como representativa de las condiciones de partida. El potencial impacto estético o visual de un proyecto propuesto puede entonces ser estimado otra vez sobre los registros base o índices, por ejemplo, la comparación con y sin proyecto.

(10) **Revisión Bibliográfica.** Supone ensamblar información sobre los tipos de proyectos y su impacto típico. Como se notará, por analogías, este tipo de información puede ser muy útil para la pronta definición de impactos potenciales. Puede también ser usado para cuantificar anticipadamente, cambios específicos e identificar las medidas de mitigación para minimizar efectos indeseables. Actualmente está disponible una abundante información sobre impactos típicos de algunos proyectos.

(11) **Cálculos de balance de materia.** Están basados inicialmente en inventarios de condiciones existentes para compararlas con los cambios que resultarán de una acción propuesta. Tales inventarios son frecuentemente usados en los procesos de EIA en el contexto de las emisiones de contaminantes al aire, al agua, y la generación de residuos sólidos y peligrosos. Los **cálculos de balance de materia** requieren la descripción del área de estudio para establecer las condiciones iniciales. Una manera de expresar el impacto es considerar los cambios absolutos y porcentuales en el inventario (o **balance de materia**) como resultado de una acción propuesta.

(12) **Matrices de interacción,** representan un tipo de método ampliamente usado en los procesos de EIA. Las variaciones de las matrices sencillas de interacción han sido desarrolladas para enfatizar rasgos característicos deseables, las matrices representan un tipo de método muy útil para el estudio de diversas actividades dentro de los procesos de EIA.

(13) **Monitorización.** Se refiere a mediciones sistemáticas para establecer las condiciones existentes de los ambientes afectados así como dotar de una base inicial de datos para interpretar la importancia de cambios anticipados de un proyecto propuesto. La **monitorización** podría enfocarse a los ambientes fisicoquímico, biológico, cultural y/o socioeconómico. La selección de indicadores apropiados para el seguimiento deberá ser realizado tanto en función de la disponibilidad de la información existente como del tipo de proyecto y de los impactos previstos.

(14) **Estudios de campo.** Representa un tipo de método muy especializado. Específicamente, monitorización y análisis de impactos evidentes, manifestados actualmente a consecuencia del proyecto, resultantes de proyectos similares al proyecto del que se quiere prevenir los impactos. Una vez más, el énfasis se dará al seguimiento de indicadores seleccionados pertinentemente para el tipo de proyecto.

(15) **Redes.** Se refiere a un grupo de métodos que definen las conexiones o relaciones entre acciones proyectadas e impactos resultantes. Estos tipos de métodos están referenciados de alguna manera con la práctica de EIA, por ejemplo, árboles de impacto, impacto de cambios, diagramas causa-efecto o diagramas de consecuencias. Las redes son útiles para mostrar las relaciones entre impactos primarios, secundarios y terciarios, resultantes de acciones particulares. Pueden también ser utilizados junto con matrices como una herramienta para la identificación de impactos y la predicción cualitativa de los mismos.

(16) **Sobreposición de mapas.** Propuesto por McHarg (1969) ha servido de base a otros métodos utilizados en la actualidad cuando se trata de localizar un pasillo o trazo lineal para vías de acceso, gasoductos o líneas de transmisión de energía eléctrica. Fue usado desde que comenzaron a requerirse las EIA, inicialmente consistió en un ensamble físico de mapas que desplegaban diferentes características ambientales, ahora se hace digitalmente. La tecnología de los sistemas de información geográfica (GIS) es una herramienta inspirada en este tipo de método bastante útil en los procesos de EIA. La **sobreposición cartográfica de transparencias**, físicamente o digitalizada, se usa para describir condiciones existentes y desplegar cambios potenciales resultantes de una acción propuesta.

(17) **Fotografías o fotomontajes** son útiles como herramientas para propósitos de desplegar la calidad visual del ambiente seleccionado e identificar los potenciales impactos visuales de una acción propuesta. En ese considerando, esta aplicación está relacionada con los métodos de evaluación del paisaje descritos anteriormente, con la ventaja adicional del uso de la fotografía digitalizada.

(18) **Modelización cualitativa.** Se refiere a un grupo de métodos en el que, información descriptiva es utilizada para relacionar varias acciones con cambios resultantes en los componentes ambientales. Como tal, puede ser considerada como una extensión de las categorías de redes de trabajo descritas anteriormente. El enfoque general del **modelaje cualitativo** está en la comprensión de las interrelaciones fundamentales de los aumentos o disminuciones en ciertos rasgos ambientales como resultado de acciones particulares. En muchos casos, el **modelaje cualitativo** representa el único tipo de método disponible para la predicción de impactos. Nótese que está típicamente basado en opiniones de expertos (dictámenes profesionales) como se describió oportunamente.

(19) **Modelización cuantitativa** (matemática). Se refiere a un extenso grupo de métodos, usados específicamente para prestar atención anticipadamente a los cambios en el medio ambiente o los recursos, como resultado de acciones propuestas. Tales modelos pueden variar desde versiones simplificadas a muy complicadas simulaciones tridimensionales basadas en ordenador que requieren de una gran cantidad de datos. Es importante reconocer que los modelos cuantitativos están disponibles para muchas de las áreas típicas de impactos asociados con proyectos particulares. Por ejemplo, hay algunos modelos de dispersión que se pueden usar para conocer anticipadamente los impactos en la calidad del aire por fuentes fijas de emisión de propuestas de incineradores de residuos peligrosos o de plantas de producción de electricidad que queman combustibles fósiles; igualmente, existen modelos de dispersión para prever la calidad del agua en los casos de vertidos contaminantes a cuerpos receptores de agua superficial y subterránea.

(20) **Evaluación de riesgo.** Es una herramienta emergente para la práctica de EIA. Inicialmente fue usada para establecer estándares ambientales basados en temas de salud humana. La **evaluación de riesgos** típicamente abarca la identificación de los riesgos, consideraciones sobre la relación dosis-repuesta, conducción de un evaluación a la exposición, y evaluación del riesgo asociado. Esta aplicación puede ser usada tanto para riesgo a la salud humana como para riesgo ecológico.

(21) **Construcción de escenarios.** Involucra consideraciones alternativas futuras como resultado de suposiciones iniciales diferentes. Esta técnica se utiliza en las

áreas de planeación, pero también tiene aplicabilidad en EIA, particularmente en el contexto de la Evaluación Ambiental Estratégica (SEA) de políticas, planes y programas.

(22) **Extrapolación de tendencias.** Utiliza tendencias históricas y las proyecta al futuro basada en suposiciones asociadas a condiciones de cambio continuo. Tales métodos son particularmente valiosos cuando se enfocan a condiciones ambientales futuras sin que haya necesariamente una acción propuesta.

Para seleccionar una metodología, se recomienda tomar en cuenta algunas características importantes como: si da una visión global, si es selectivo, mutuamente excluyente, si considera la incertidumbre, si es objetivo e interactivo.

Entre las varias metodologías generales existentes, se pueden seleccionar en función de que representan un amplio rango de opciones, las siguientes:

- Listas de chequeo
- Matriz de Leopold
- Sistema de evaluación ambiental Batelle-Columbus
- Método de transparencias (Mc Harg)
- Análisis costes-beneficios
- Modelos de simulación
- Sistemas basados en un soporte informatizado del territorio

A continuación se desarrollan de manera específica algunos de estos métodos.

3.1.1 Listas de chequeo

La fase de identificación de los impactos es muy importante porque una vez conocidos los efectos se pueden valorar las consecuencias, con mas o menos precisión por diferentes sistemas, para no omitir ningún aspecto importante, se hace útil elaborar

una lista de control lo más amplia posible, tanto de los componentes o factores ambientales como de las actividades del proyecto.

La principal función de esta lista es la de servir en las primeras etapas para identificar los impactos ambientales, su contenido cambia según el tipo de proyecto y el medio de actuación, por lo que no son inmutables. Hay dos tipos de componentes a conocer, unos ambientales en los que se incluyen elementos de naturaleza física, biológica y humana y otros que serían los componentes del proyecto en el que se incluyen las actuaciones realizadas en las etapas de preconstrucción, construcción y explotación.

Para construir una lista de control, se puede tomar como referencia la propuesta por Leopold et al (1971) para su método matricial, reduciendo y adaptándola a las características del proyecto y del lugar.

Desafortunadamente no propicia el establecimiento de los vínculos causa-efecto en las diferentes actividades del proyecto y generalmente no incluye una interpretación global del impacto.

3.1.2 Método de Leopold

Desarrollado por el Servicio Geológico del Departamento del Interior de Estados Unidos, inicialmente fue diseñado para evaluar los impactos asociados con proyectos mineros y posteriormente ha resultado útil en proyectos de construcción de obras. Se desarrolla una matriz al objeto de establecer relaciones causa-efecto de acuerdo con las características particulares de cada proyecto, a partir de dos listas de chequeo que contienen 100 posibles acciones proyectadas y 88 factores ambientales susceptibles de verse modificados por el proyecto (Leopold et al., 1971).

Realmente, no es un sistema de evaluación ambiental, es esencialmente un método de identificación y puede ser usado como un método de resumen para la comunicación de resultados.

Para la utilización de la Matriz de Leopold, el primer paso consiste en la identificación de las interacciones existentes, para lo cual, se deben de tomar en cuenta todas las actividades que pueden tener lugar debido al proyecto. Se recomienda operar con una matriz reducida, excluyendo las filas y las columnas que no tienen relación con el proyecto. Posteriormente y para cada acción, se consideran todos los factores ambientales que puedan ser afectados significativamente, trazando una diagonal en las cuadrículas donde se interceptan con la acción.

Cada cuadrícula marcada con una diagonal admite dos valores:

- 1) **magnitud**: *valoración del impacto o de la alteración potencial a ser provocada; grado, extensión o escala*; se coloca en la mitad superior izquierda. Hace referencia a la intensidad, a la dimensión del impacto en sí mismo y se califica del 1 al 10 de menor a mayor, anteponiendo un signo + para los efectos positivos y – para los negativos.
- 2) **importancia**: *valor ponderal, que da el peso relativo del potencial impacto*, se escribe en la mitad inferior derecha del cuadro. Hace referencia a la relevancia del impacto sobre la calidad del medio, y a la extensión o zona territorial afectada, se califica también del 1 al 10 en orden creciente de importancia.

Una vez llenas las cuadrículas el siguiente paso consiste en evaluar o interpretar los números colocados.

Un ejemplo sencillo sería el vertido de unas aguas residuales con un caudal de 30 l/h y con una concentración de DBO_5 de 100mg/l, que se descargue a un río con un caudal de estiaje de 8 m³/s, o a otro río con un caudal de estiaje de 50 m³/s. La magnitud en ambos casos es la misma (se está vertiendo la misma cantidad de materia orgánica), pero el impacto es mucho más importante en el primer caso que en el segundo.

Puede haber factores ambientales que sean afectados de forma crítica, pero que dentro del medio receptor, ese factor no tenga excesiva importancia o al contrario, un impacto de magnitud limitada, aunque solo sea temporalmente, sea de una gran importancia al afectar a un factor ambiental que posea una gran calidad ambiental.

El texto que acompañe la matriz consistirá en la discusión de los impactos más significativos, es decir aquellos cuyas filas y columnas estén señalados con las mayores calificaciones y aquellas celdas aisladas con números superiores.

Ciertas celdas pueden señalizarse, si se intuye que una condición extrema puede ocurrir, aunque su probabilidad sea baja.

La matriz de Leopold es "global", ya que cubre las características geobiofísicas y socioeconómicas, además de que el método incluye características físicas, químicas y biológicas.

El método no es "selectivo", no se distingue por ejemplo, entre efectos a corto y largo plazo. La propiedad de "mutuamente exclusivo" no está preservada, ya que hay la oportunidad de contar doble, siendo este un fallo de esta matriz y no de los métodos de matriz en general.

La matriz puede acomodar datos cuantitativos y cualitativos. Pero no prevé medios para discriminar entre ambos tipos de datos. Además las magnitudes de las predicciones no están relacionadas explícitamente con las situaciones "con acción" y "sin acción".

La "objetividad" no es un elemento sobresaliente en la Matriz de Leopold, ya que se puede libremente efectuar la propia clasificación en la escala numérica entre el 1 y el 10 y no contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.

El enfoque matricial tiene sus limitaciones, aunque puede proveer una ayuda inicial en la configuración de los estudios necesarios y ser conveniente para efectuar un análisis preliminar entre diferentes alternativas, reducir el número de relaciones causa-efecto (impactos/celdas) a considerar y que sean preparadas una serie de matrices de acuerdo a las necesidades del estudio:

- un conjunto para los efectos ambientales y otro conjunto para los indicadores de impacto

- un conjunto según diferentes escalas en el tiempo
- un conjunto para cada alternativa

A continuación se indican distintos méritos y desventajas que este método presenta:

Méritos:

- Fuerza a considerar los posibles impactos de acciones proyectuales sobre diferentes factores ambientales.
- Incorpora la consideración de magnitud e importancia de un impacto ambiental.
- Permite la comparación de alternativas, desarrollando una matriz para cada opción.
- Sirve como resumen de la información contenida en el informe de impacto ambiental.

Desventajas:

- Dificil reproducibilidad, debido al carácter subjetivo del proceso de evaluación, pues no contempla metodología alguna para determinar la magnitud ni la importancia de un impacto.
- No tiene en consideración las interacciones entre diferentes factores ambientales.
- No distingue entre efectos a corto y largo plazo, aunque pueden realizarse dos matrices según dos escalas de tiempo.
- Los efectos no son exclusivos o finales, existe la posibilidad de considerar un efecto dos o más veces.

A continuación se incluyen las listas de factores ambientales que pudieran verse impactados y la de acciones probables de un proyecto.

Tabla 3.1. Factores Ambientales (Matriz de Leopold, 1971)

A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS	
A.1 TIERRA	
a. Recursos minerales	d. Geomorfología
b. Material de construcción	e. Campos magnéticos y radiactividad de fondo
c. Suelos	f. Factores físicos singulares
A.2 AGUA	
a. Superficiales	e. Temperatura
b. Marinas	f. Recarga
c. Subterráneas	g. Nieve, hielos y heladas
d. Calidad	
A.3 ATMÓSFERA	
a. Calidad (gases, partículas)	c. Temperatura
b. Clima (micro, macro)	
A.4 PROCESOS	
a. Inundaciones	e. Sorción (intercambio de iones, complejos)
b. Erosión	f. Compactación y asentamientos
c. Deposición (sedimentación y precipitación)	g. Estabilidad
d. Solución	h. Sismología (terremotos)
	i. Movimientos de aire
B. CONDICIONES BIOLÓGICAS	
B.1 FLORA	
a. Árboles	f. Plantas acuáticas
b. Arbustos	g. Especies en peligro
c. Hierbas	h. Barreras, obstáculos
d. Cosechas	i. Corredores
e. Microflora	
B.2 FAUNA	
a. Aves	f. Microfauna
b. Animales terrestres, incluso reptiles	g. Especies en peligro
c. Peces y mariscos	h. Barreras
d. Organismos bentónicos	i. Corredores
e. Insectos	
C. FACTORES CULTURALES	
C.1 USOS DEL TERRITORIO	
a. Espacios abiertos y salvajes	f. Zona residencial
b. Zonas húmedas	g. Zona comercial
c. Selvicultura	h. Zona industrial
d. Pastos	i. Minas y canteras
e. Agricultura	
C.2 RECREATIVOS	
a. Caza	e. Camping
b. Pesca	f. Excursión
c. Navegación	g. Zonas de recreo
d. Zona de baño	
C.3 ESTÉTICOS Y DE INTERÉS HUMANO	
a. Vistas panorámicas y paisajes	f. Parques y reservas
b. Naturaleza	g. Monumentos
c. Espacios abiertos	h. Especies o ecosistemas especiales
d. Paisajes	i. Lugares u objetos históricos o arqueológicos
e. Agentes físicos singulares	j. Desarmonías
C.4 NIVEL CULTURAL	
a. Modelos culturales (estilos de vida)	c. Empleo
b. Salud y seguridad	d. Densidad de población
C.5 SERVICIOS E INFRAESTRUCTURA	
a. Estructuras	d. Disposición de residuos
b. Red de transportes (movimiento, accesos)	e. Barreras
c. Red de servicios	f. Corredores
D. RELACIONES ECOLÓGICAS	
a. Salinización de recursos hidráulicos	e. Salinización de suelos
b. Eutrofización	f. Invasión de maleza
c. Vectores, insectos y enfermedades	g. Otros
d. Cadenas alimentarias	
E. OTROS	

Tabla 3.2. Acciones propuestas que pueden causar Impacto Ambiental (Matriz de Leopold, 1971)

A. MODIFICACIÓN DEL REGIMEN:	
a) Introducción de flora y fauna exótica	g) Control del río y modificación del flujo
b) Controles biológicos	h) Canalización
c) Modificación del hábitat	i) Riego
d) Alteración de la cubierta terrestre	j) Modificación del clima
e) Alteración de la hidrología	k) Incendios
f) Alteración del drenaje	l) Superficie o pavimento
	Ruido y vibraciones
B. TRANSFORMACIÓN DEL TERRITORIO Y CONSTRUCCIÓN:	
a) Urbanización	k) Revestimiento de canales
b) Emplazamientos industriales y edificio	l) Canales
c) Aeropuertos	m) Presas y embalses
d) Autopistas y puentes	n) Escolleras, diques, puertos deportivos y terminales marítimas
e) Carreteras y caminos	o) Estructuras en alta mar
f) Vías férreas	p) Estructuras recreacionales
g) Cables y elevadores	q) Voladuras y perforaciones
h) Líneas de transmisión, oleoductos y corredores	r) Desmontes y rellenos
i) Barreras incluyendo vallados	s) Túneles y estructuras subterráneas
j) Dragados y alineado de canales	
C. EXTRACCIÓN DE RECURSOS:	
a) Voladuras y perforaciones	e) Dragados
b) Excavaciones superficiales	f) Explotación forestal
c) Excavaciones subterráneas	g) Pesca comercial y caza
d) Perforación de pozos y transporte de fluidos	
D. PROCESOS:	
a) Agricultura	h) Industria química
b) Ganaderías y pastoreo	i) Industria textil
c) Piensos	j) Automóviles y aviones
d) Industrias lácteas	k) Refinerías de petróleo
e) Generación energía eléctrica	l) Alimentación
f) Minería	m) Herrerías (explotación de maderas)
g) Metalurgia	n) Celulosa y papel
	o) Almacenamiento de productos
E. ALTERACIONES DEL TERRENO:	
a) Control de la erosión, cultivo en terrazas o bancales	d) Paisaje
b) Sellado de minas y control de residuos	e) Dragado de puertos
c) Rehabilitación de minas a cielo abierto	f) Aterramientos y drenajes
F. RECURSOS RENOVABLES:	
a) Repoblación forestal	c) Recarga aguas subterráneas
b) Gestión y control vida natural	d) Fertilización
	e) Reciclado de residuos
G. CAMBIOS EN TRÁFICO:	
a) Ferrocarril	g) Deportes náuticos
b) Automóvil	h) Caminos
c) Camiones	i) Telecillas, telecabinas, etc.
d) Barcos	j) Comunicaciones
e) Aviones	k) Oleoductos
f) Tráfico fluvial	
H. SITUACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS	
a) Vertidos en mar abierto	h) Vertido de aguas de refrigeración
b) Vertedero	i) Vertido de residuos urbanos
c) Emplazamiento de residuos y desperdicios mineros	j) Vertido de efluentes líquidos
d) Almacenamiento subterráneo	k) Balsas de estabilización y oxidación
e) Disposición de chatarra	l) Tanques y fosas sépticas, comerciales y domésticas
f) Derrames en pozos de petróleo	m) Emisión de corrientes residuales a la atmósfera
g) Disposición en pozos profundos	n) Lubricantes o aceites usados
I. TRATAMIENTO QUIMICO:	
a) Fertilización	c) Estabilización química del suelo
b) Descongelación química de autopistas, etc.	d) Control de maleza y vegetación terrestre
	e) Pesticidas
J. ACCIDENTES:	
a) Explosiones	c) Fallos de funcionamiento
b) Escapes y fugas	
K. OTROS:	
a)...	..b).

3.1.3 Método Battelle-Columbus

Fue elaborado para la planificación y gestión de recursos hídricos en Estados Unidos. Al aplicarlo a otros proyectos, sirve la metodología pero hay que revisar los valores asignados a los índices ponderales e incluso modificar sus componentes (Battelle-Columbus Laboratories, 1972).

Se puede usar con dos fines:

- Medir el impacto ambiental sobre el medio de diferentes proyectos de uso de recursos hídricos (análisis de proyectos, escala micro).
- Planificar a medio y largo plazo proyectos con el mínimo impacto ambiental posible (evaluación ambiental estratégica de planes y programas, escala macro).

Se basa en una lista de *indicadores de impacto*, con 78 *parámetros* o factores *ambientales*, que representan una unidad o un aspecto del medio ambiente que merece considerarse por separado y cuya evaluación es representativa del impacto ambiental derivado de las acciones o proyectos.

Estos *parámetros* están ordenados en un primer nivel según los 18 “*componentes ambientales*” siguientes:

Especies y poblaciones	Suelo
Hábitat y comunidades	Biota
Ecosistema	Objetivos artesanales
Contaminación del aire	Composición
Contaminación del agua	Valores educacionales y científicos
Contaminación del suelo	Valores históricos
Ruido	Cultura
Aire	Sensaciones
Agua	Estilos de vida (patrones culturales)

Estos componentes ambientales se agrupan en cuatro “*categorías ambientales*”:

- Ecología
- Contaminación
- Aspectos estéticos
- Aspectos de interés humano

Los niveles de información progresiva que se requiere son:

Categorías → Componentes → Parámetros

Se pretende que los parámetros se lleguen a evaluar en unidades comparables (conmensurables), representando valores que en lo posible sean resultado de mediciones reales y que:

- Representen la calidad del medio ambiente.
- Sean fácilmente medibles sobre el terreno
- Respondan a las exigencias del proyecto a evaluar, y
- Sean evaluables a nivel de proyecto.

Para transformar estos datos en “*unidades de impacto ambiental*” (UIA) se tienen que:

- Transformar los datos en su correspondiente equivalencia de *índice de calidad ambiental* para el *parámetro* correspondiente.
- Ponderar la importancia del *parámetro* considerado, según su importancia relativa dentro del medio ambiente.
- A partir de lo anterior, expresar el **impacto neto** como resultado de multiplicar el **índice de calidad** por su **índice ponderal**.

Para calcular el **índice de calidad ambiental** en unidades que sean comparables, se le asigna un valor de 1 al valor óptimo del parámetro (por ejemplo, DBO₅, COV, etc.) y al pésimo el de 0, quedando comprendido entre ambos extremos los valores intermedios para definir los estados de calidad del parámetro.

La “*función de transformación f(M_i) o de evaluación*” de la calidad ambiental de un parámetro *i* en términos de su magnitud (M) se define como:

$$CA_i = f(M_i)$$

Esta función (calidad-magnitud) puede ser lineal con pendiente positiva o negativa, puede ser una curva con un punto máximo o mínimo, directa o inversa, dependiendo del comportamiento del parámetro seleccionado y del entorno físico y socioeconómico del proyecto, pudiendo revisarse o modificarse de acuerdo con las necesidades particulares del caso.

Si consideramos que cada parámetro representa sólo una parte del medio ambiente, es importante disponer de un mecanismo según el cual todos ellos se puedan contemplar en conjunto y además, ofrezcan una imagen coherente de la situación al hacerlo. Para lograrlo, hay que reflejar la diferencia entre unos parámetros y otros, por su mayor o menor contribución a la situación del medio ambiente. Con este fin se atribuye a cada parámetro un peso o *índice ponderal*, expresado en forma de “unidades de importancia” distribuyendo cien, mil puntos o los que se establezcan (el modelo original considera mil unidades) de manera relativa entre los parámetros considerados. Para evitar interpretaciones subjetivas, se recomienda que se usen los mismos índices ponderados en contextos socioeconómicos similares o proyectos parecidos.

Por esta razón, en el método Battelle-Columbus, junto a cada parámetro, se indican las UIP (unidades de importancia del parámetro), o índice ponderal, así como los que corresponden por suma de aquellos niveles de agrupación de parámetros, componentes y categorías.

Para la obtención de las **unidades de impacto neto** (conmensurables), en caso de que los parámetros definidos no se hallen en situación óptima, su contribución a la situación del medio vendrá disminuida en el mismo porcentaje que su calidad y, en consecuencia, sus unidades de impacto ambiental (UIA) expresadas por:

$$(UIA) = (CA)_i \times (UIP)_i$$

Aplicando el sistema establecido a la situación del medio si se lleva a cabo el proyecto (“con proyecto”) y a la que tendría el medio si no se realiza (por la suma del estado cero y la evolución sin proyecto previsible), tendremos para cada parámetro unos valores cuya diferencia nos indicará el impacto neto del proyecto según dicho parámetro:

$$(UIA)_i \text{ con proyecto} - (UIA)_i \text{ sin proyecto} = (UIA)_i \text{ con proyecto}, \quad \text{que puede ser positivo o negativo}$$

Considerando además que las UIA evaluadas para cada parámetro, son conmensurables, podemos sumarlas y evaluar el impacto global de las distintas alternativas de un proyecto para obtener la óptima por comparación. Al mismo tiempo, sirve esta evaluación global para tomar las medidas conducentes a minimizar el impacto ambiental del proyecto y apreciar la degradación del medio como resultado del proyecto, tanto globalmente como en sus distintos sectores (categorías, componentes o parámetros).

Para cada parámetro pueden reflejarse los valores en UIA correspondientes “con proyecto”, “sin proyecto” y el referente al proyecto por diferencia de los dos. El impacto total del proyecto será la suma de los impactos, expresados en UIA.

Del sistema original, lo válido es el marco conceptual y la metodología de cálculo de las UIA a través de las funciones de transformación. Por consiguiente, el primer paso es definir los factores ambientales e indicadores de impacto relativos al proyecto y luego establecer la matriz, con la ponderación de los parámetros.

El modelo dispone además de un “sistema de alerta” por considerar que hay que destacar ciertas situaciones críticas. Aunque el impacto ambiental de un proyecto sea admisible, puede haber ciertos parámetros que hayan sido afectados en forma mas o menos inadmisibles, a tal efecto se establece la utilización de banderas o señales rojas producidas por el proyecto. Pueden reflejarse así para cada parámetro, los valores en UIA_i neto correspondientes a:

- “Con proyecto”, $(UIA)_{i,(cp)}$
- “Sin proyecto”, $(UIA)_{i,(sp)}$ y

- “Debido al proyecto”, $(UIA)_{i,(dp)}$ por la diferencia de ambos.

Si la alteración es significativa, se dispone de una bandera roja grande o pequeña.

A efectos de una evaluación global o de comparación de alternativas, podemos hacer las adiciones que se crean necesarias, siendo el impacto global debido al proyecto:

$$\text{Impacto global} = \sum_{i=0}^{i=n} (UIA)_{i,(dp)}$$

La **Figura 3.1** esquematiza el sistema de valoración de este método, con cuatro categorías, diez y ocho componentes y setenta y ocho parámetros ambientales.

Los resultados se van asentando en las hojas de valoración como las de la **Tabla 3.3** que se representa el formato del sistema de valoración y sobre ellas se hacen los cálculos, que finalmente conducen a la evaluación del impacto global.

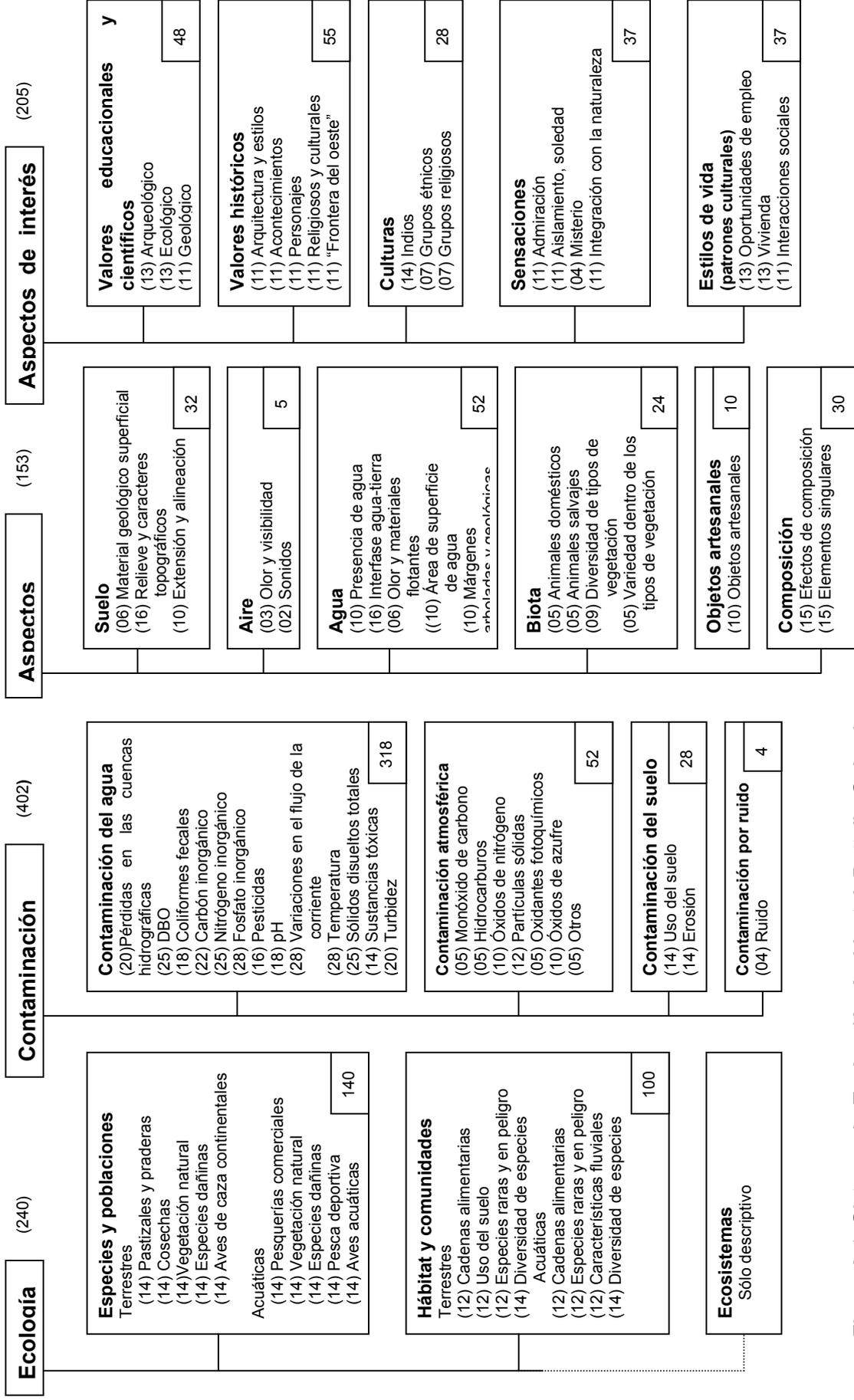


Figura 3.1. Sistema de Evaluación Ambiental Battelle-Columbus

Tabla 3.3. Sistema de valoración ambiental Battelle-Columbus (SP: sin proyecto; CP: con proyecto)

Localización del proyecto: _____
 Nombre del proyecto: _____
 Fecha de evaluación: _____
 Lugar evaluado: _____
 Equipo evaluador: _____

ECOLOGÍA	Valor Unidades Impacto Ambiental (UIA)			Señales de alerta	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	Valor Unidades Impacto Ambiental (UIA)			Señales alerta
	CP	SP	Cambio neto			SP	CP	Cambio neto	
Especies y poblaciones					Contaminación del agua				
Terrestres					(20) Pérdidas en las cuencas hidrográficas				
(14) Pastizales y praderas					(25) DBO				
(14) Cosechas					(32) Oxígeno disuelto				
(14) Vegetación natural					(18) Coliformes fecales				
(14) Especies dañinas					(22) Carbono inorgánico				
(14) Aves de caza continentales					(25) Nitrógeno inorgánico				
Acuáticas					(28) Fósforo inorgánico				
(14) Pesquerías comerciales					(16) Pesticidas				
(14) Vegetación natural					(18) pH				
(14) Especies dañinas					(28) Variación de flujo de la corriente				
(14) Pesca deportiva					(28) Temperatura				
(14) Aves acuáticas					(25) Sólidos disueltos totales				
(140) Subtotal					(14) Sustancias tóxicas				
Habitats y comunidades					(20) Turbidez				
Terrestres					(318) Subtotal				
(12) Cadenas alimentarias					Contaminación atmosférica				
(12) Uso del suelo					(05) Monóxido de carbono				
(12) Especies raras y en peligro					(05) Hidrocarburos				
(14) Diversidad de especies					(10) Óxidos de nitrógeno				
Acuáticas					(12) Partículas sólidas				
(12) Cadenas alimentarias					(05) Oxidantes fotoquímicos				
(12) Especies raras y en peligro					(10) Óxidos de azufre				
(12) Características fluviales					(05) Otros				
(14) Diversidad de especies					(52) Subtotal				
(100) Subtotal					Contaminación del suelo				
Ecosistemas					(14) Uso del suelo				
Factores estéticos					(14) Erosión				
(240) Ecología total					(28) Subtotal				
					Contaminación por ruido				
					(04) Ruido				
					(402) Contaminación ambiental total				

ASPECTOS ESTÉTICOS	Valor unidades de impacto ambiental (UIA)			Señales alerta
	CP	SP	Cambio neto	
Suelo				
(06) Material geológico				
(16) Relieve y caracteres topográficos				
(10) Extensión y alineaciones				
(32) Subtotal				
Aire				
(03) Olor y visibilidad				
(02) Sonidos				
(05) Subtotal				
Agua				
(10) Presencia de agua				
(16) Interfase agua-tierra				
(06) Olor y materiales flotantes				
(10) Área de superficie de agua				
(10) Márgenes arboladas y geológicas				
(52) Subtotal				
Biota				
(05) Animales domésticos				
(05) Animales salvajes				
(09) Diversidad de tipos de vegetación				
(05) Variación de tipos de vegetación				
(24) Subtotal				
Objetos artesanales				
(10) Objetos artesanales				
(10) Subtotal				
Composición				
(15) Efectos de composición				
(15) Elementos singulares				
(30) Subtotal				
(153) Factores estéticos total				
ASPECTOS DE INTERÉS HUMANO	Valor unidades de impacto ambiental (UIA)			Señales alerta
	CP	SP	Cambio neto	
Valores educativos y científicos				
(13) Arqueológico				
(13) Ecológico				
(11) Geológico				
(11) Hidrológico				
(48) Subtotal				
Valores históricos				
(11) Arquitectura y estilos				
(11) Acontecimientos				
(11) Personajes				
(11) Religiosos y culturales				
(11) "Frontera del oeste"				
(55) Subtotal				
Culturas				
(14) Indios				
(07) Grupos étnicos				
(07) Grupos religiosos				
(28) Subtotal				
Sensaciones				
(11) Admiración				
(11) Aislamiento, soledad				
(04) Misterio				
(11) Integración con la naturaleza				
(37) Subtotal				
Estilos de vida (Patrones culturales)				
(13) Oportunidades de empleo				
(13) Vivienda				
(11) Interacciones sociales				
(37) Subtotal				
(205) Factores de interés humano total				

		Resumen de resultados				
		Ecología	Contaminación ambiental	Factores estéticos	Factores de interés humano	Total
	Señales de alerta					
Valor unidades de impacto ambiental (UIA)	CP					
	SP					
	Cambio neto					

Méritos del método:

- ✓ Se trata del primer esfuerzo serio de valoración de impactos que ha servido de base a métodos posteriores.
- ✓ Los parámetros o factores ambientales se transforman a unidades conmensurables (comparables) representativas de la calidad del medio ambiente, lo que permite la adición de las magnitudes de impacto para cada acción y para cada factor ambiental.
- ✓ Para cada parámetro pueden reflejarse los valores en unidades de impacto ambiental (UIA) correspondientes “con proyecto”, “sin proyecto” y el referente al proyecto por diferencia de los dos.
- ✓ Permite el cálculo del impacto ambiental global del proyecto y la comparación de alternativas al proyecto.

Desventajas:

- ✓ Fue diseñado para determinar el impacto ambiental de proyectos hidráulicos. Para otro tipo de proyectos se deben proponer nuevos índices ponderales (UIP) y seleccionar las funciones de transformación que sean aplicables.
- ✓ Tiene el inconveniente de que las unidades ponderales de los parámetros (UIP) se asignan de manera subjetiva.
- ✓ El árbol de factores ambientales y el de acciones-actividades se deben adaptar al tipo de proyecto y al medio receptor.
- ✓ En la vida real los factores ambientales son ilimitados y no es posible contar con todas las funciones de calidad ambiental para todos los proyectos posibles.
- ✓ Las funciones de transformación que proponen los Laboratorios Batelle-Columbus son específicas para planificación y gestión de recursos hídricos

3.1.4 Método de transparencias

Con este método propuesto por Ian L. Mc Harg (1969) en su libro "Design with nature" editado por The American Museum of Natural History Press/ Doubleday, se han evaluado proyectos como el trazado de una autopista, una carretera, un ferrocarril, líneas eléctricas de alta tensión, oleoductos y gasoductos, aeropuertos, canales y algunos otros enfocados a la localización de usos en el territorio, para distintas actividades sociales y económicas. La razón es porque tiene en cuenta las características del territorio, sin llegar a una evaluación profunda de los impactos pero haciendo una identificación e inventariado de los recursos para la integración del proyecto al entorno, de la forma más armoniosa posible, dejando íntegras las zonas de gran valor social, con el costo mínimo y la obtención de plusvalía.

El procedimiento comienza en la elaboración de un inventario, que se representa en mapas con los siguientes factores de forma aislada: clima, geología, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo. En el inventario se tiene en cuenta la causalidad de los factores citados, que considera como indicadores de los procesos naturales, requiriéndose así la comprensión de la naturaleza como un proceso. El clima y la geología hacen posible interpretar la fisiografía, que a su vez, determina la hidrología y todo ello permite comprender la formación del recurso suelo. La distribución de la vegetación es el resultado de la interacción entre los factores citados, y la fauna está íntimamente ligada a ella. Por último, los usos del suelo, al menos hasta épocas recientes, han estado estrechamente relacionados con las características del medio.

Por otra parte, se interpretan los datos del inventario en relación con las actividades objeto de localización y se traduce en mapas de capacidad intrínseca para cada una de las actividades: agricultura, recreo, selvicultura y uso urbano.

Se superpone en transparencias la cartografía lograda utilizando para cada componente o grupo de componentes un color con sus diferentes matices que muestre el nivel de resistencia que cada uno ofrece al proyecto, para hacer resaltar las zonas de gran sensibilidad ambiental que habrá que escatimar y aquellas otras donde las

obras proyectadas se podrán llevar a cabo causando el mínimo perjuicio. Este trabajo de superposición de mapas actualmente se puede hacer en forma digital a través de un ordenador que facilita la tarea y permite una mayor riqueza y precisión de la información, con la ventaja de la estética en la presentación.

Nada suple la evaluación del experto en la interpretación de las posibilidades de ordenación o planificación territorial y sus consecuencias sobre el medio ambiente.

3.1.5 Análisis costes-beneficios

Un análisis costes-beneficios, puede permitir valorar un problema ambiental mediante una comparación de los costes por daños frente a los costes para evitarlos. Cuando existen datos, este sistema analítico, de tipo económico, puede ser usado para comparar opciones alternativas.

En un análisis costes-beneficios, los costes se sitúan en oposición a los beneficios. Aunque este concepto posee elementos engañosos, ya que el contrario de los beneficios son los desbeneficios. El procedimiento costes-beneficios supone un intercambio a dos bandas cuando en la realidad es un trato a tres bandas. Los desbeneficios, como tercer elemento, han estado claramente desvinculados de este proceso de análisis. La industrialización dio a este proceso un ímpetu sin precedentes. Es esta una de las razones de la problemática ambiental a la cual nos enfrentamos. Como el papel de los desbeneficios no se consideró en el proceso, no se le incluyó en las cuentas. La pérdida de calidad ambiental y de diversidad tampoco se tuvo presente. (Baldasano, 2002)

El intento actual es tener en consideración y valorar estos desbeneficios, que es un reconocimiento del hecho de que el crecimiento ilimitado genera desbeneficios y pérdida de calidad ambiental. Es también una reconciliación con los desbeneficios - tanto sociales como ambientales-.

Un marco utilizado para evaluar el daño a los recursos naturales y elegir entre diferentes opciones de restauración consiste en tres pasos principales:

- Evaluación del daño y su significado;
- Principales posibilidades de restauración, y
- Posibilidades de restauración compensatoria.

El primer paso concierne a la definición del estado del recurso antes del incidente que ha provocado el daño, la evaluación de la escala de daño, la evaluación del impacto y cómo determinar si el daño es "significativo".

El segundo paso clarifica cómo abordar la restauración principal, es decir, las medidas dirigidas a restaurar el recurso dañado y, si es posible, regresar al recurso al punto de referencia (anterior al incidente). Este paso concierne al establecimiento de los objetivos de la restauración, la identificación y la elección de las principales opciones de restauración y la estimación de las pérdidas provisionales.

El tercer paso trata sobre cómo establecer los objetivos para las opciones de restauración compensatoria y cómo calcular la compensación monetaria y, también, cómo identificar y elegir las opciones de compensación.

Todo ello implica definir un marco y métodos para evaluar el daño a los recursos naturales. Por ejemplo, el estudio de casos, el papel de la evaluación económica y del análisis de coste-beneficio dentro de ese marco.

3.1.6 Modelos de predicción

Están basados en modelos de transporte y transformación de contaminantes en la atmósfera o el agua superficial y subterránea.

Si existen datos básicos suficientes y correctos de la zona de afectación por las emisiones o vertidos de uno o varios focos, estos métodos efectúan un análisis mediante la modelización de las características básicas de los medios emisor, difusor y receptor, considerando las interrelaciones temporales y espaciales.

Los modelos matemáticos permiten obtener datos y resultados concretos de los siguientes aspectos:

- Evaluación del impacto ambiental de un foco contaminante de la atmósfera, ya sea de nueva implantación o existentes, o de focos múltiples.
- Estudio de situaciones preoperacionales, o de punto cero, para determinar la contaminación de fondo existente en un lugar.
- Determinación de la capacidad de carga de un centro urbano o zona industrial.
- Diseño de redes de vigilancia de la calidad del aire.
- Optimización de la altura de chimenea para grandes y medianas instalaciones.
- Predicción de la contaminación potencial.
- Planificación urbana e industrial, en el ámbito local, regional y nacional.

3.1.7 Sistemas basados en un soporte informatizado del territorio (SIG)

Los Sistemas computarizados de Información geográfica (SIG), surgen como una herramienta para el manejo de los datos espaciales, aportando soluciones a problemas geográficos complejos, lo cual permite mejorar la habilidad del usuario en la toma de decisiones en investigación, planificación y desarrollo.

Entre las aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica, se destacan los servicios ofrecidos para:

Desarrollar proyectos de investigación interdisciplinarios en:

- Proyectos de ingeniería ambiental
- Manejo de recursos naturales, geológicos hídricos y energéticos
- Proyectos de planeación urbana
- Formación y actualización catastral

Procesamiento y análisis de imágenes de satélite para:

- Estudios de impacto ambiental
- Planes de uso del suelo
- Estudios sobre recursos naturales
- Geomorfología

Producción de modelos de elevación digital para:

- Cálculo de volúmenes en el diseño de vías.
- Ubicación de sitios de presas
- Cálculo de mapas de pendientes y perfiles para el apoyo de estudios geomorfológicos y estimativos de erosión
- Mapas temáticos que combinan relieve sombreado con información temática como suelos, cobertura y uso del suelo.

En la elaboración del **Estudio de Impacto Ambiental** para:

- Identificación y valoración del estado preoperacional del medio
- Elaboración de inventarios estandarizados para los factores ambientales, y generación de la cartografía temática asociada
- Identificación y valoración de impactos potenciales
- Selección de alternativas

Los sistemas de información geográfica (SIG) son útiles en algunas fases del proceso de EIA. Este sistema de manejo de datos automatizado por ordenador puede capturar, gestionar, manipular, analizar, modelar y trazar datos con dimensiones espaciales para resolver la planeación compleja y la gestión de problemas. Algunas aplicaciones y/o operaciones con GIS contienen los siguientes elementos esenciales: adquisición de datos, preprocesamiento, gestión de datos, manipulación y análisis y, generación de la producción. La adquisición de datos se refiere al proceso de identificación y recopilación de los datos requeridos para la aplicación. Después del acopio de datos, el procedimiento usado para convertir un conjunto de datos dentro de un formato apropiado para introducir el GIS, se llama preprocesamiento. La conversión del formato de datos como digitalización de mapas impresión de registros y grabación de esta información en una base de datos del ordenador, es el paso clave en el

preprocesamiento. El preprocesamiento también incluye proyección de mapas, reducción y generalización de datos, detección de errores e interpolación.

El administrador de la base de datos, proporciona a los usuarios de los medios para definir su contenido, insertar un nuevo dato, borrar datos antiguos, identificar el contenido y modificarlo en la base de datos. El conjunto de datos se puede manipular como lo requiera el análisis. Algunas de las operaciones usadas en la manipulación de los datos son similares a las del preprocesamiento. Con un SIG son posibles muchos tipos de análisis, entre ellos está la combinación matemática de capas, operaciones Booleanas y con programas externos usando el SIG como una base de datos, simulaciones complejas. Finalmente la estructura de un SIG contiene software para desplegar mapas, graficas e información tabular sobre una variedad de medios de salida, esto permite al usuario maximizar el efecto la presentación de resultados.

La aplicación de la tecnología SIG al proceso de EIA se ha hecho apenas en años recientes. Relativo a las fases de EIA, la SIG puede tener aplicación directamente o como herramienta de soporte en todas ellas. Además, se puede usar SIG como una herramienta en el seguimiento o monitoreo de impactos y gestión del proyecto.

El desarrollo e implementación de un SIG para usarse en el proceso de EIA típicamente supone identificación y conceptualización, planeación y diseño, adquisición y desarrollo, instalación y operación, revisión y supervisión. Este proceso necesita ser cuidadosamente planeado si van a ser aprovechados los beneficios del SIG como herramienta de gestión de datos.

Aunque los SIG ofrecen muchas ventajas como herramienta en los estudios de impacto ambiental, tienen muchas limitaciones, por ejemplo:

1. La tecnología para modelar SIG todavía no ha sido suficientemente desarrollada para lograr ciertos modelos ambientales complejos,
2. Los enlaces a otros paquetes de software o a programas de propósito especial puede necesitar que se desarrolle especialmente para una aplicación de EIA y
3. Muy poca de la información requerida para estudios de EIA está también disponible de forma que pueda ser cargada directamente al SIG.

3.2 Análisis multicriterio en las decisiones ambientales

La teoría de la decisión ha sido estudiada extensamente en el ámbito de las ciencias de la economía y la ingeniería; los métodos más usados en la actualidad son producto de la investigación realizada en esas áreas del conocimiento.

La teoría de la decisión se ha orientado a dos direcciones distintas:

- Una denominada positiva o empírica que consiste en elaborar una serie de articulaciones lógicas que pretenden explicar y predecir el comportamiento de los agentes decisores reales.
- Otra llamada normativa que define la racionalidad de los decisores basándose en una serie de supuestos justificables intuitivamente, para posteriormente realizar una serie de operaciones lógicas que permitan deducir el comportamiento óptimo compatible con la racionalidad previamente establecida.

El enfoque positivo corresponde a una filosofía de *cómo son* (como se comportan) mientras que el enfoque normativo obedece a *cómo deben de ser* (cómo deben comportarse) los centros decisores.

Con algunas excepciones, la teoría económica se apoya en una teoría de la decisión normativa simplificada a un solo criterio (por ejemplo: el beneficio) que define correctamente sus preferencias. Esto choca con la percepción empírica de que los agentes decisores no optimizan sus decisiones basándose en un solo objetivo sino que está influenciado por una gama de objetivos usualmente en conflicto.

El impulso en la década de los setenta del modelo de decisión multicriterio con enfoque positivo (empírico) ha supuesto una verdadera revolución en el campo de la teoría de la decisión, sosteniendo que los agentes económicos buscan un equilibrio o compromiso entre un conjunto de objetivos usualmente en conflicto y pretenden satisfacer en la medida de lo posible una serie de metas asociadas a dichos objetivos.

Desde el punto de vista de las aplicaciones en las empresas y las organizaciones, el análisis multicriterio se desarrolla en dos formas:

- Decisión multicriterio discreta, que se interesa por la elección entre un número finito de alternativas posibles (proyectos, inversiones, candidatos, etc.).
- Decisión multicriterio continua, se centra fundamentalmente en la programación lineal con criterios múltiples, generalizando al caso de criterios múltiples, los resultados de programación lineal y de sus algoritmos asociados.

Actualmente no es posible ignorar que cada decisión real consiste de hecho en un compromiso entre diversas soluciones, cada una con sus ventajas y sus inconvenientes, dependiendo de la posición que se adopte (Barba-Romero *et al.*, 1997). Cada vez será más difícil, no tener en consideración los diferentes puntos de vista, motivaciones o fines, ya que los tiempos de la “*ficción monoobjetivo*” están finalizando; ahora es preciso tener en cuenta los deseos de los distintos actores y la pluralidad de sus intenciones.

Lo mismo que en economía, agronomía, ingeniería industrial y ciencias sociales, la teoría de decisiones es una herramienta muy necesaria en aplicaciones de las ciencias ambientales como evaluación de impactos ambientales, evaluación estratégica ambiental de políticas, programas y proyectos , planificación territorial, etc.

El problema de la decisión multicriterio se plantea tanto en las empresas como en la administración pública, pues es difícil que una decisión respecto a un equipamiento público satisfaga a todos los actores implicados, como es raro que el trazado menos caro de una autovía, sea también el que gusta más a todo el mundo y el que mejor respeta al medio ambiente ya que el costo entra a menudo en conflicto con otros criterios.

Las situaciones en que un decisor se ve confrontado con una elección, en presencia de criterios múltiples son muy numerosas. El decisor se encuentra en disposición de escoger entre varias posibilidades denominadas *alternativas*, el conjunto de las cuales constituye el llamado *conjunto de elección*. Para escoger en este conjunto de elección

el decisor tiene diversos puntos de vista, denominados *criterios*. Estos *criterios* son, al menos parcialmente, contradictorios en el sentido de que si el decisor adopta uno de dichos puntos de vista, no escogerá la misma alternativa que si se basa en otro criterio.

Hoy en día la decisión multicriterio puede ser considerada como un campo de actividad en el que la aplicabilidad práctica y las herramientas informáticas son dominantes. Es cierto que las investigaciones teóricas no están desprovistas de interés, pero suelen dedicarse más a la profundización, que a los fundamentos. Al contrario, las posibilidades informáticas no han sido totalmente explotadas, pudiéndose incluso afirmar que la utilización efectiva de los métodos multicriterio en contextos profesionales apenas está comenzando.

Los procesos de toma de decisiones, tradicionalmente se han analizado basándose en el siguiente esquema (Romero, 1993):

1. Se establece el conjunto de soluciones factibles del problema de decisión analizado.
2. Partiendo de un cierto *criterio*, se asocia a cada solución o alternativa, un número que representa el grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el centro decisor.
3. Se establece una ordenación de las soluciones factibles.
4. Utilizando técnicas matemáticas mas o menos sofisticadas, se procede a buscar entre las soluciones factibles aquella que posee un mayor grado de deseabilidad y esa alternativa es la " *solución óptima*".

Este sencillo marco de análisis, es el que subyace a cualquier problema de decisión investigado, dentro del marco tradicional de la optimización y los problemas de decisión abordados por medio de la programación matemática, se ajustan a este tipo de estructura teórica; en esta clase de problemas las soluciones posibles son aquellas que satisfacen las restricciones del problema. Estas decisiones posibles se ordenan con arreglo a un cierto criterio que representa las preferencias del centro decisor. Esta función de criterio recibe el nombre de **función objetivo** y recurriendo a técnicas

matemáticas relativamente sofisticadas se establece la “**solución óptima**” como aquella solución factible para la que la función objetivo alcanza un valor óptimo.

Desde un punto de vista lógico, la secuencia antes mencionada posee una gran solidez y podría decirse que su coherencia interna es perfecta, pero desde el punto de vista empírico, el marco teórico anterior presenta importantes debilidades que lo desvían considerablemente de los procesos reales de toma de decisiones. En muchos casos de la vida ordinaria, los *centros decisores* no están interesados en ordenar las soluciones factibles con arreglo a un único criterio, sino que desean efectuar esta tarea con arreglo a diferentes criterios que reflejen sus particulares preferencias.

Por mencionar algunos casos, diremos que una empresa desea establecer sus decisiones óptimas, no sólo en base al criterio de máximo beneficio, sino que otros criterios como volumen de ventas, crecimiento del mercado, factores de riesgo, periodo de recuperación de la inversión, protección del medio ambiente, etc., pueden reflejar las preferencias empresariales. En una agricultura de subsistencia, un campesino puede estar interesado en la rotación de cultivos que maximiza el margen, que produce alimentos suficientes para el sostenimiento familiar, que maximiza el ocio, minimiza la erosión, aumenta el aprovechamiento del agua, etc. Los responsables de la política pesquera de un país al optimizar la estructura de la flota, pueden desear ordenar las políticas factibles con arreglo a criterios de coste, empleo, mantenimiento biológico de ciertas especies, etc. Al diseñar la política económica de un país se pueden tener en cuenta criterios tales como: tasa de inflación, nivel de empleo, déficit de la balanza de pagos, crecimiento del producto interno bruto, conservación de recursos naturales, etc.

Estos y otros ejemplos ponen de manifiesto que los centros decisores *reales* toman en cuenta varios objetivos y no aplican un único criterio como los métodos tradicionales lo han simplificado y cuyo comportamiento queda considerablemente alejado de la práctica cotidiana del mundo en que vivimos.

Para una mejor comprensión del modelo de decisión multicriterio, se exponen a continuación algunos conceptos que forman parte del lenguaje común a la teoría de decisión.

Atributo son valores que se pueden medir, independientemente de los deseos del centro decisor y normalmente se expresan como una función matemática $f(x)$ de las variables de decisión, por ejemplo: el beneficio y el volumen de ventas son dos atributos que representan valores del centro decisor.

Objetivos, representan direcciones de mejora de los atributos, es decir, *maximizar* o *minimizar* las funciones que corresponden a los **atributos** que reflejan los valores del centro decisor; por ejemplo: $\text{Max } f(x)$ o $\text{Min } g(x)$, maximizar las ventas, minimizar los riesgos, minimizar costes, etc.

Nivel de aspiración, representa un nivel aceptable de logro para el correspondiente *atributo*. La combinación de un **atributo** con un *nivel de aspiración* genera una **meta**; por ejemplo: alcanzar un cierto nivel de ventas, representa una **meta**, su expresión matemática será $f(x) \geq t$ en algunos casos el centro decisor puede desear alcanzar exactamente el *nivel de aspiración*, en tal caso, la expresión matemática de la **meta** será $f(x) = t$ donde el parámetro t representa el *nivel de aspiración*.

Criterios, constituyen los *atributos*, *objetivos* o *metas* que se consideran relevantes para un cierto problema de decisión.

Una aclaración pertinente es señalar la diferencia entre *metas* y *restricciones*, cuando aparentemente no existiría ninguna diferencia entre ambos conceptos, pues ambas se representan como desigualdades, la sutileza reside en el significado que se dé al término de la derecha de la correspondiente desigualdad. Si se trata de una *meta*, el término de la derecha es un *nivel de aspiración* deseado y puede o no ser alcanzado, pero si la desigualdad se refiere a una *restricción*, el término de la derecha debe alcanzarse o la solución será no factible o será inalcanzable. En otras palabras, las *metas* permiten ciertas violaciones de las inecuaciones, lo que no es posible en el dominio de las *restricciones*.

El concepto de **optimalidad paretiana**, juega un papel esencial en los diferentes enfoques desarrollados de los modelos de multicriterio, ya que es una condición exigida como necesaria, para poder garantizar la racionalidad de las soluciones

generadas. Puede definirse como: *un conjunto de soluciones es eficiente (o pareto optimas) cuando está formado por soluciones factibles (que cumplen las restricciones), tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos.*

Todos los enfoques multicriterio pretenden obtener soluciones que sean eficientes en el sentido paretiano, incluso, en la programación multiobjetivo, el primer paso consiste en obtener el conjunto de soluciones factibles y eficientes; es decir, el conjunto de soluciones posibles se particiona en dos subconjuntos disjuntos; el subconjunto de soluciones factibles no eficientes y el subconjunto de soluciones factibles eficientes. Una vez alcanzada la partición, se introducen las preferencias del centro decisor con objeto de obtener un compromiso entre las soluciones factibles y las eficientes.

El concepto de *optimalidad paretiana* nos conduce a otro concepto crucial en el campo multicriterio: el concepto de **tasa de intercambio o trade-off** entre dos criterios; que significa la cantidad de logro que debe sacrificarse para conseguir a cambio un incremento unitario en el otro criterio.

Las *tasas de intercambio* tienen un doble interés dentro de la metodología multicriterio; por una parte, constituyen un buen índice para medir el coste de oportunidad de un criterio en términos de los otros criterios que estemos considerando y por otra, juega un papel crucial en el desarrollo de los métodos interactivos multicriterio, representando una especie de diálogo en el que el centro decisor trasmite al analista sus preferencias, medidas por las *tasas de intercambio*.

La diferenciación conceptual entre *atributos, objetivos y metas*, nos permite efectuar una primera aproximación metodológica a los diferentes enfoques multicriterio.

Cuando el centro decisor toma sus decisiones en un contexto de objetivos múltiples, el enfoque multicriterio a considerar es la **programación multiobjetivo**.

- El primer paso dentro de este enfoque consiste en generar el conjunto eficiente,
- El segundo paso consiste en buscar un compromiso óptimo para el centro decisor, de entre las soluciones eficientes.

Si el centro decisor tiene que tomar una decisión en un contexto de metas múltiples, el enfoque multicriterio a considerar es la **programación por metas**. Este tipo de optimización se aborda por medio de la minimización de las desviaciones entre los logros realmente alcanzados y los niveles de aspiración fijados previamente. Con este propósito, se introducen variables de desviación positivas y negativas, que permitan tanto el exceso como la falta de logro para cada meta.

Cuando el contexto en el que el centro decisor tiene que tomar su decisión está caracterizado por varios atributos, el enfoque de multicriterio a considerar es la **teoría de la utilidad con atributos múltiples**, el propósito de este enfoque consiste en construir una *función de utilidad* con un número de argumentos igual al número de atributos que se consideren relevantes para el problema de decisión que estemos analizando. Este tipo de enfoque se aplica a problemas de decisión con un número discreto de soluciones factibles, como ocurre con los problemas ambientales y exige la aceptación de supuestos muy fuertes acerca de las preferencias del centro decisor.

Existen entonces numerosos métodos de decisión multicriterio, cada uno con sus ventajas y sus inconvenientes, lo que debería permitir encontrar aquel más adaptado al problema en cada caso, pero finalmente la elección del método es menos importante que el análisis y la modelización multicriterio previos, seguido de una interpretación y discusión adecuadas.

El análisis multicriterio tiene a su favor el realismo y la legibilidad, que son activos importantes en las organizaciones, en un momento en el que la complejidad de las decisiones es reconocida por la mayor parte de los actores, aún cuando no todos ellos muestren la misma sensibilidad ante los diferentes criterios. Sabemos ya que toda decisión, incluso individual, es un compromiso entre diversas aspiraciones difíciles de satisfacer en toda su plenitud. La decisión es por definición, el lugar de expresión de una elección política en el sentido más amplio del término, o empresarial si se prefiere.

Es importante comprender, a veces incluso contra la opinión de modelizadores o tecnócratas, que los métodos multicriterio no son portadores de una racionalidad

inmanente y es necesario discernir entre lo que dicen verdaderamente los modelos y lo que los analistas hábiles pueden hacerles decir.

Planteamiento del problema de decisión

Se plantea un problema de toma de decisiones con criterios múltiples o multicriterio (MCDM) cuando un decisor tiene que elegir entre un conjunto de alternativas, continuo o discreto, teniendo en cuenta distintos criterios o puntos de vista. En este contexto se dispone de diferentes modelos para analizar las situaciones de decisión que se pueden derivar del problema planteado.

La mayoría de los problemas de decisión se pueden plantear bajo tres puntos de vista (Aragonés, 1997):

- Los estados de la naturaleza: ambiente de certidumbre o incertidumbre y riesgo.
- Los criterios de decisión: monocriterio o multicriterio.
- Las características del conjunto de alternativas: continuas o discretas.

Fuera de este esquema básico hay que considerar tres casos especiales:

- Cuando en el proceso de decisión se introduce la imprecisión, la inexactitud o la falta de determinación del decisor. Este problema se puede abordar mediante la aplicación de la *lógica difusa*.
- Los problemas de análisis de inversiones en ambiente aleatorio, en los que el tiempo es un factor a tener en cuenta.
- Cuando el decisor es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión, de tal forma que tienen que adoptar una solución única que refleje globalmente las opiniones o intereses del grupo.

Los elementos básicos que intervienen en un proceso de toma de decisiones multicriterio son los siguientes:

- **Decisor** o unidad de decisión, es el conjunto de personas interesadas en el problema de decisión.
- **Alternativas**, es el conjunto de soluciones, estrategias, acciones o decisiones posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema que se considere.
- **Ambiente** o contexto de la situación de decisión, es el conjunto de características que define la situación de decisión con respecto al entorno, también se le llama estado del ambiente o de la naturaleza.
- **Criterios**, son los objetivos, atributos y metas que se consideran relevantes en un contexto de decisión.
- **Solución eficiente**, es el conjunto de soluciones factibles tales que no existe otra que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. También se le conoce como solución pareto-óptima.

Actualmente la cultura científica continúa privilegiando la noción de “la mejor decisión” cuando el óptimo en el sentido estricto del término, no existe en el análisis multicriterio, ni en la inmensa mayoría de las situaciones reales de decisión.

Planteamiento formal

Formalmente los elementos de partida de un problema de decisión multicriterio son los siguientes:

- Un conjunto de decisiones alternativas $\mathbf{x} \in X$ que puede ser finito o no.
- Un conjunto de estados de la naturaleza $\mathbf{s} \in S$.
- El conjunto de objetivos $\mathbf{z} \in Z$.

Para cada decisión \mathbf{x} y para cada estado \mathbf{s} , tenemos $\mathbf{z} = \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{s})$

de modo que $\mathbf{z}: X \times S \rightarrow Z \subset \mathbb{R}^n$ está caracterizado por sus atributos $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_n)$

Una vez identificado el conjunto de objetivos $\mathbf{z}(\mathbf{x}) = (z_1(\mathbf{x}), \dots, z_n(\mathbf{x}))$ se puede formalizar el problema de la siguiente manera:

$$\max \mathbf{z}(\mathbf{x}) = (z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \dots, z_N(\mathbf{x}))$$

donde: $\mathbf{x} \in X$ es el conjunto de alternativas factibles

z_i , desde $i = 1, 2, \dots, N$ son funciones objetivo.

La noción de *preferencia* juega un papel fundamental en los distintos modelos de decisión en los cuales el decisor, pone de manifiesto sus inclinaciones o predilecciones acerca de cómo y que cualidades deberían tener las alternativas que solucionan su problema. Se asume que el decisor establece sus preferencias comparando las alternativas dos a dos de manera que cuando compara una alternativa a con otra b , puede reaccionar de la siguiente forma:

- Prefiere una de las dos alternativas.
- Permanece indiferente ante cualquiera de las dos alternativas
- Rechaza o no es capaz de comparar las alternativas.

Estas relaciones del decisor se pueden formalizar del siguiente modo:

- a es estrictamente preferida a b (aPb o bPa si la preferida es b)
- a es indiferente a b (aIb)
- Son incompatibles (aJb)

La preferencia, indiferencia o incompatibilidad se pueden considerar relaciones binarias establecidas sobre el par ordenado (a,b) en la que se sustenta la modelización matemática de la toma de decisiones.

Para poder realizar un tratamiento sistemático del problema de decisión, es necesario evaluar de algún modo las relaciones de preferencia entre las distintas alternativas implicadas en el proceso de decisión y establecer un modelo mediante el cual, se pueda resolver el problema y trasladar los resultados obtenidos en el modelo, a la realidad.

Criterios de decisión

Los criterios constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias, su selección es sumamente importante en cualquier proceso de toma de decisiones, ya que un planteamiento inadecuado puede llevar a resultados no satisfactorios o invalidar el proceso.

Para la definición de los criterios, se propone establecer una jerarquía de objetivos, lo cual consiste en especificar los objetivos fundamentales de *alto nivel* que el decisor pretende alcanzar y los objetivos más concretos y detallados de bajo nivel, cuidando no caer en la excesiva proliferación de jerarquías en sentido horizontal y vertical. A cada nivel de la jerarquía de objetivos se puede asociar un atributo, que cuantifica el grado de cumplimiento del objetivo correspondiente, de manera que cada atributo cumpla con las siguientes propiedades:

- *Comprehensibilidad*: el valor del atributo ha de ser adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado.
- *Medibilidad*: el atributo es medible cuando es posible asociar a los distintos niveles una escala conocida.

La elección del atributo adecuado para cuantificar el objetivo asociado será tanto más fácil, cuanto más claro y mejor definido esté este objetivo. Muchas veces, el atributo se puede medir mediante una escala objetiva; es decir, una escala conocida y comúnmente aceptada, de forma que sus diferentes niveles se pueden medir, sin embargo algunas veces hay atributos que no se pueden medir o evaluar mediante este tipo de escalas y hay que construir una escala subjetiva; en este caso el decisor se ve obligado a realizar una valoración cualitativa del atributo y posteriormente construir una escala subjetiva para esa valoración, para sortear esta dificultad, es posible utilizar también, atributos indirectos o aproximativos.

Un atributo indirecto es aquel que refleja el grado en el cual un objetivo asociado se alcanza midiendo indirectamente el logro del objetivo.

La subjetividad

La construcción de los criterios para jerarquizar los objetivos, depende de la unidad de decisión, del tipo de problema y del entorno, lo que hace que la jerarquía de objetivos no sea única. Existen muchos factores que limitan la objetividad en la selección de los objetivos y de los atributos que los cuantifican, principalmente durante la construcción de la jerarquía de objetivos, en la selección de los atributos y en la forma de cuantificar y asignar escalas.

Es necesario que todos los actores que intervienen en el proceso de toma de decisiones reúnan las siguientes características para que sea más fácil lograr el consenso:

1. Conocer con profundidad el problema y por tanto ser capaces de generar los criterios más adecuados.
2. Tener entera libertad de opinar y colaborar en la generación de criterios.
3. Entender y aceptar la jerarquía de objetivos y los atributos asociados una vez que se haya analizado por todos los actores y alcanzado un consenso.
4. El método de evaluación de las distintas alternativas respecto a cada criterio, debe ser entendido y aceptado por todos los actores implicados en el problema y liberado de elementos asociados a valores subjetivos.
5. Tener en cuenta la *calidad de los datos* utilizados en la generación de los criterios, analizando los elementos de imprecisión, incertidumbre o inadecuada determinación de los mismos.

Clasificación de los problemas de toma de decisiones

A partir de la formulación matemática del problema de toma de decisiones con multicriterio, se puede establecer la siguiente clasificación:

- a. El conjunto de alternativas posibles $x \in X$ es numerable, en este caso el problema de decisión es **discreto** y se pueden presentar las situaciones siguientes como las más comunes:

- Un número de alternativas elevado, número de criterios pequeño (menor a diez), los valores de los criterios se conocen con certeza y las alternativas se conocen *a priori*.
 - Como en el anterior pero los valores de los criterios no se conocen con certeza (se modelan siguiendo una distribución de probabilidad)
 - Un pequeño número de alternativas conocidas *a priori*, evaluadas utilizando un número elevado de criterios y con una estructura jerárquica.
 - El número de alternativas es muy elevado (infinito) o la generación de las mismas es muy costosa o difícil. Se tiene que tomar dos tipos de decisión:
 - 1) Identificar la alternativa preferida o
 - 2) Identificar si continúa o no la búsqueda de alternativas mejores.
 - El que toma la decisión no es capaz o no está inclinado a especificar explícitamente sus criterios.
- b. El conjunto de alternativas posibles $\mathbf{x} \in X$ no es numerable, el problema de decisión es **continuo** y las alternativas están definidas en forma implícita. Los casos más estudiados son:
- El modelo subyacente es lineal, las variables son continuas, el número de criterios es pequeño, el tamaño del problema es de pequeña escala. Las relaciones entre las variables son cuantitativas y el espacio de decisión se conoce *a priori*
 - Como en el apartado anterior con la excepción de que el modelo utiliza funciones de restricción no lineales.
 - Como en el primer apartado salvo que algunas o todas las variables asumen valores enteros.
 - Como en el primer apartado con la excepción de que el modelo es de gran escala.
 - Como en el primer inciso con la excepción de alguna o todas las relaciones entre variables son cualitativas.

Sobre estas situaciones hay que añadir el problema de la incertidumbre que se plantea cuando las variables asociadas a los atributos son aleatorias.

En la **Tabla 3.4** se resumen las principales técnicas de decisión multicriterio y sus características:

Por experiencia se sabe que en una evaluación de impactos ambientales, el conjunto de alternativas posibles se puede enumerar y no son demasiadas, por lo que el problema de decisión normalmente es **discreto**.

Estas familias de métodos de decisión no están exentas de ciertos problemas, como el de no poder manejar dentro de su metodología información de naturaleza cualitativa. Sin embargo, la información contenida en los problemas de decisión reales, normalmente es tanto cuantitativa como cualitativa. Tradicionalmente estos métodos han realizado una transformación a una escala numérica de la información cualitativa del problema de decisión, para poder ser utilizada directamente en estos métodos de decisión.

La principal dificultad de los problemas multicriterio que pueden aparecer en la vida real, recae en el hecho de que son problemas matemáticos mal definidos, es decir, que no tienen una solución objetiva. Generalmente no existe una solución, que podamos decir que sea la mejor de entre todas las demás para todos los aspectos a tener en cuenta.

Resolver un problema de decisión multicriterio, no es por consiguiente buscar una especie de solución oculta, sino ayudar al decisor a utilizar los datos involucrados en el problema, a menudo complejos, a avanzar hacia una buena solución del problema.

Dentro de los métodos discretos, seleccionaremos los de sobreclasificación, particularmente ELECTRE Y PROMETHEE, por adaptarse mejor a las necesidades de la evaluación ambiental, también son conocidos como métodos de superación. Esta familia de métodos, de inspiración francesa, intenta construir una *relación de sobreclasificación* que modelice las mismas preferencias que posee el decisor, seguidamente se utiliza ésta para resolver el problema, ayudando por lo tanto a tomar una decisión.

Tabla 3.4. Clasificación de Técnicas de Decisión Multicriterio

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN BÁSICA	APLICACIONES
MÉTODOS BASADOS EN LA TEORÍA DE LA UTILIDAD MULTICRITERIO	Se dispone de una información completa sobre las preferencias del decisor de tal forma que se puede construir una función de valor o función de utilidad, en el caso de que exista incertidumbre, que agrega las funciones de valor/utilidad de cada uno de los criterios.	<ul style="list-style-type: none"> • Caso discreto: asignación de la función de valor/utilidad. • Caso continuo: resolver el programa matemático: $\max v(\mathbf{z}(\mathbf{x})), \quad \mathbf{x} \in X$
MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO	El conjunto X de alternativas es continuo. No se tiene la información sobre las preferencias del decisor suficiente para construir una función de valor. Se plantean unas funciones objetivo que hay que optimizar.	<ul style="list-style-type: none"> • Programación compromiso • Programación por metas
MÉTODOS INTERACTIVOS	Se tiene información parcial sobre las preferencias del decisor. Interactúa el analista con el decisor de forma que se parte de una solución inicial que el decisor evalúa en base a sus preferencias, las cuales se introducen en el modelo para generar una nueva solución.	<ul style="list-style-type: none"> • Método STEM. • Método Zionts y Wallenius. • Método Geoffrion, Dyer y Feinberg. • Surrogate Worth Trade-off. • Otros.
MÉTODOS DISCRETOS	El conjunto X de alternativas es discreto	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos basados en la función de valor: <ul style="list-style-type: none"> -Suma ponderada -Método UTA -Programa VISA. • Método de las jerarquías analíticas (AHP) • Métodos de sobreclasificación ELECTRE PROMETHEE • Método PRES II • TOPSIS • CODASID

Clasificación propuesta por Korhonen, P., et al. (1992).

El concepto de *sobreclasificación* también denominado de *superación*, fue concebido por un grupo de investigadores franceses a mediados de los años 60's, entre ellos hay que destacar a Bernard Roy, uno de los coautores del método ELECTRE (*Elimination Et Chix Traduisant la Realité*), considerado como el más representativo de esta familia de métodos.

En estos métodos subyace la idea de que es mejor aceptar un resultado menos exacto, si con ello se evita introducir hipótesis matemáticas demasiado fuertes, y abrumar al decisor con cuestiones normalmente demasiado difíciles.

Estos *métodos* en general, están entre la relación de dominancia⁽¹⁾ (demasiado pobre para ser útil ya que pocos pares de alternativas realmente verifican esta relación), y la función de utilidad multiatributo (demasiado rica para ser realizable), por lo tanto, pretenden enriquecer la relación de dominancia, mediante elementos que no padezcan ninguna discusión por considerar preferencias fuertemente establecidas.

El concepto de sobreclasificación se puede expresar como: "*una relación binaria S definida sobre un conjunto de alternativas A*". Dadas dos alternativas $a, b \in A$, se dice que la alternativa a supera a la alternativa b (aSb), si conocidas las preferencias del decisor, la calidad de la evaluación de las alternativas, y la naturaleza del problema, hay suficientes argumentos para decir que a es al menos tan buena como b , mientras que no existan razones esenciales para rechazar esta declaración.

En general dadas dos alternativas a y b es posible encontrar las siguientes situaciones:

- ✓ aSb o bSa ,
- ✓ aSb y bSa , lo que implica que alb (a es indiferente o equivalente a b)
- ✓ a y b son incomparables, es decir no se verifica ninguna de las circunstancias anteriores.

⁽¹⁾ Relación binaria que determina qué alternativas dominan o superan al resto de alternativas para todos los criterios de decisión.

Las relaciones de superación no son necesariamente transitivas. Esto es, si aSb y bSc , ello no necesariamente implica que aSc . Esto hace que este método sea simultáneamente práctico y ambiguo, a semejanza de multitud de casos que se encuentran en la vida cotidiana. La relación de superación en ELECTRE se determina aplicando índices de concordancia y de discordancia en forma simultánea para decidir acerca de:

- ✓ la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria;
- ✓ obtener una jerarquización de las acciones, alternativas bajo análisis.

Originada y desarrollada por la escuela francófona (principalmente en Francia, Bélgica, Suiza, aunque ya puede considerarse continental puesto que se verifican muy importantes contribuciones de los Países Bajos y Polonia, entre otros, a tal esquema), se han desarrollado los procedimientos ELECTRE I, II, III, IV, IS y Electre TRI, que brindan opciones para resolver diferentes tipos de problemas en el tratamiento de la teoría de la decisión.

3.3 Técnicas difusas en la evaluación del impacto ambiental

3.3.1 Conceptos

Hemos visto en el apartado 3.1 que existen distintas metodologías para llevar a cabo los Estudios de Impacto Ambiental, independientemente de cuál se emplee, deben enfrentarse varias dificultades, inherentes a la propia naturaleza de los estudios:

- Un Estudio de Impacto Ambiental es una predicción sobre la forma en que un proyecto repercutirá sobre el entorno, por lo tanto, como en toda predicción, es de esperar que la incertidumbre esté presente en algunos de los parámetros involucrados.

- El entorno es muy complejo, y por lo tanto no se puede describir con un único modelo. Esto obliga a modelar el entorno como un conjunto de *factores ambientales* que sean relevantes, representativos y fácilmente analizables.
- Aunque cada factor sea susceptible de ser analizado por separado, los factores ambientales son muy diferentes entre sí, y por lo tanto es difícil agregar la información parcial de cada factor para obtener un análisis global del entorno. Esta situación se acentúa aún más si, como es usual, el estudio de cada factor se lleva a cabo por un experto (o un grupo de expertos) diferente.
- Algunas de las variables involucradas son de tipo numérico (cuantitativo), mientras que otras son de tipo lingüístico (cualitativo); el modelo matemático que se emplee para efectuar el estudio debe ser capaz de combinar ambos tipos de variables de forma coherente.
- El nivel de detalle con que se desea efectuar el estudio no es siempre el mismo, sino que varía según la fase en que se esté desarrollando el proyecto (estudios de prefactibilidad, de factibilidad económica, de factibilidad técnica, proyecto técnico, etc.); La metodología empleada debe adecuarse a distintos niveles de detalle, es decir, a distintas granularidades en la descripción del problema.

Como consecuencia de lo anterior, las metodologías de estudios de impacto ambiental conocidas suelen adolecer de varias deficiencias, como por ejemplo:

- No se valora la imprecisión de la predicción realizada.
- No se incorporan adecuadamente al análisis aquellas variables no medibles.
- Las metodologías evalúan los impactos pero no proponen cómo modificarlos.

Por otra parte, es bien conocido en el ámbito de la Computación Flexible, que las *Técnicas Difusas* son una herramienta útil para abordar problemas en los que la imprecisión y la vaguedad estén presentes, y que también brinda un marco adecuado para tratar simultáneamente variables numéricas y lingüísticas.

De lo anterior se desprende que: *“Las Técnicas Difusas pueden ayudar a subsanar las dificultades que presentan las metodologías actuales de Evaluación del Impacto*

Ambiental relacionadas con la combinación de información cuantitativa y cualitativa, y con la presencia de incertidumbre”.

Duarte, (2000) propone una nueva metodología para los Estudios de Impacto Ambiental, empleando sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa. Esta *Métodología Difusa* puede entenderse como una extensión de la metodología convencional (crisp) a números difusos, con el propósito de:

- Incorporar en los Estudios de Impacto Ambiental la posibilidad de definir variables con incertidumbre.
- Manipular en un marco unificado las variables de tipo numérico y lingüístico.
- Caracterizar las medidas correctoras que deben tomarse para lograr que el impacto total tenga un valor “permitido”.

3.3.2 Evaluación Convencional del Impacto Ambiental

La **Figura 3.2** muestra la estructura general de una *Evaluación de Impacto Ambiental*, que se explica en forma resumida a continuación.

Las primeras cuatro fases tienen por objetivo conocer con profundidad el proyecto y sus alternativas, así como efectuar una primera aproximación a la estimación de sus consecuencias medioambientales. Las fases 5, 6 y 7 se agrupan bajo el nombre de *Valoración Cualitativa*, mientras que las fases 8, al 12 se conocen como la *Valoración Cuantitativa*⁽²⁾. La Evaluación de Impacto Ambiental puede ser *Simplificada* o *Detallada* según se omitan o no las fases 8 a 12.

⁽²⁾Los términos *valoración cualitativa* y *valoración cuantitativa* no corresponden estrictamente a los análisis cualitativos y cuantitativos de la información, ya que las herramientas matemáticas empleadas en la metodología convencional (*crisp*) no son las adecuadas para distinguir entre un caso y otro, de allí, que los calificativos de *cualitativos* y *cuantitativos* puedan prestarse a confusión. No obstante, en esta presentación de la metodología *crisp* se ha optado por emplear la terminología original, mientras que en la *metodología difusa* propuesta se ha reemplazado por *valoración aproximada* (o de *granularidad gruesa*) y *valoración detallada* (o de *granularidad fina*).

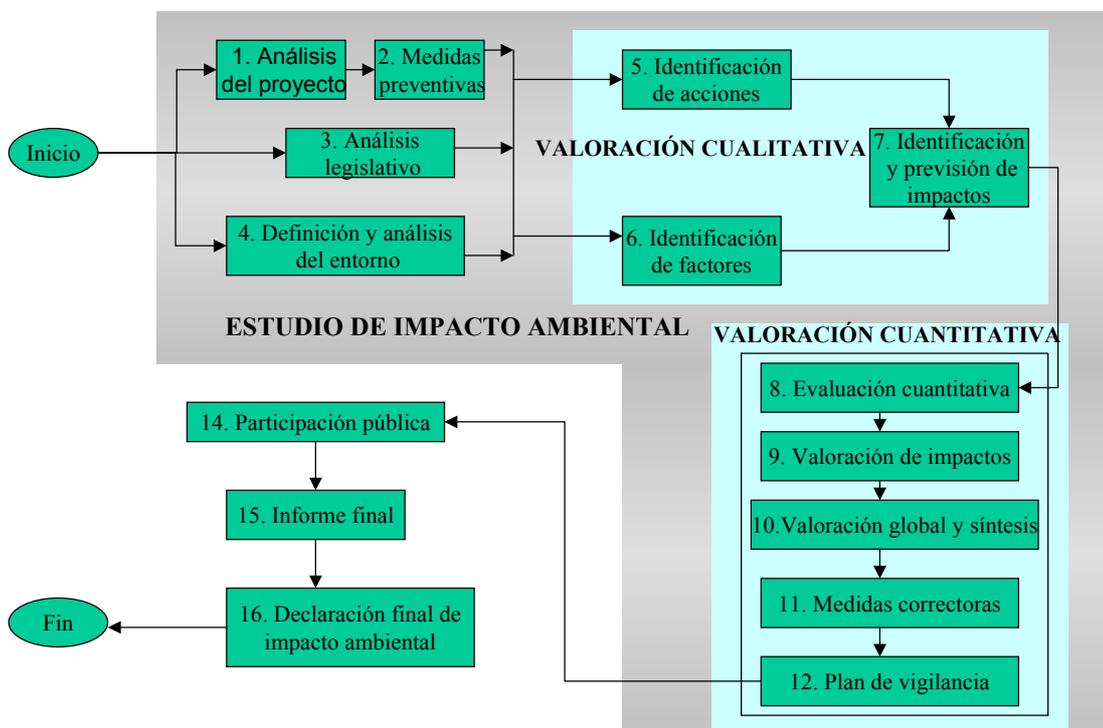


Figura 3.2. Estructura general de una Evaluación de Impacto Ambiental, modificada de Duarte (2000)

Por otra parte, las tres últimas fases se relacionan con las consecuencias sociales de la evaluación que se recopilan en la *declaración de Impacto Ambiental*.

Valoración Cualitativa

En la etapa de *Valoración Cualitativa* se busca obtener una estimación de los posibles efectos que recibirá el medio ambiente, mediante una descripción lingüística de las propiedades de tales efectos. Tal como se explicará en los siguientes apartados, los expertos deben catalogar ciertas variables con etiquetas tales como “Baja” o “Media” y a partir de esa información se obtiene un conocimiento *cualitativo* del impacto ambiental⁽³⁾.

³ *Cualitativo* en el sentido que le da a este término la metodología convencional (*crisp*), que, como se verá, no es exacto.

La metodología puede resumirse en los siguientes pasos, que se detallan a continuación:

- Describir el medioambiente como un conjunto de *factores medioambientales*.
- Describir la actividad que se evalúa como un conjunto de *acciones*.
- Identificar los *impactos* que cada *acción* tiene sobre cada *factor medioambiental*.
- Caracterizar cada *impacto* mediante la estimación de su *Importancia*.
- Analizar la *importancia* global de la actividad sobre el medio, utilizando para ello las *importancias* individuales de cada *impacto*.

El *entorno* suele dividirse en *sistemas ambientales*, éstos en *subsistemas ambientales*, los cuales a su vez se subdividen en *componentes ambientales*, que por último se dividen en *factores ambientales*. A cada *factor medioambiental* se le asigna una medida de su *Importancia* relativa al entorno, en *Unidades de Importancia (UIP)*, que servirá posteriormente para efectuar ponderaciones en las estimaciones globales de los efectos.

El proyecto que es objeto de evaluación se modela como un conjunto de *Acciones*, que pueden agruparse en *Actividades*. Una de las comparaciones más usuales consiste en enfrentar la *Situación con proyecto* con la *Situación sin proyecto*, para determinar el impacto neto de la ejecución del proyecto.

Matriz de Importancia

Una vez determinados los *factores* y las *acciones* se procede a identificar los *Impactos* que estas últimas tienen sobre los primeros. Los expertos del equipo interdisciplinar deben determinar la *Importancia* de cada efecto, siguiendo la metodología que quedará consignada en la *Matriz de Importancia* del proyecto, y cuya estructura se muestra en la **Tabla 3.5**. Las filas corresponden a los *factores* y las columnas

corresponden a las *Acciones*. En la celda ij de la Matriz se consigna la *Importancia* I_{ij} del *impacto* que la *acción* A_j tiene sobre el *factor* F_i (que tiene P_i Unidades de Importancia). La fila y la columna marcadas como *Totales* se emplean para agregar la información correspondiente a una determinada *acción* o *factor* respectivamente.

Tabla 3.5. Matriz de Importancia

FACTORES		ACCIONES			TOTALES
	UIP	A_1	A_j	A_m	
F_1	P_1	I_{11}	I_{1j}	I_{1m}	
F_i	P_i	I_{i1}	I_{ij}	I_{im}	
F_n	P_n	I_{n1}	I_{nj}	I_{nm}	
TOTALES					

Determinación de la Importancia de los Impactos

La *importancia* de un impacto es una medida cualitativa del mismo, que se obtiene a partir del grado de incidencia (*Intensidad*) de la alteración producida, y de una caracterización del efecto, obtenida a través de una serie de atributos establecidos en el Real Decreto Legislativo 1.302/1986 del 28 de junio. En la metodología *crisp* se propone calcular la *importancia* de los impactos siguiendo la expresión:

$$I_{ij} = NA_{ij}(3IN_{ij} + 2EX_{ij} + MO_{ij} + PE_{ij} + RV_{ij} + SI_{ij} + AC_{ij} + EF_{ij} + PR_{ij} + MC_{ij})$$

cuyos términos están definidos en la **Tabla 3.6**, y son explicados en los apartados siguientes. En esa misma **Tabla** se han anotado los valores numéricos que se deben asignar a las variables, según la valoración cualitativa correspondiente. Cada Impacto podrá clasificarse de acuerdo a su importancia I como:

- *Irrelevante o Compatible*: $0 \leq I < 25$
- *Moderado* : $25 \leq I \leq 50$
- *Severo* : $50 \leq I \leq 75$
- *Crítico* : $75 \leq I$

Nótese que aunque se pretende que la *importancia* sea una medida cualitativa, en realidad se calcula *cuantitativamente*, asignando para ello números enteros a cada una de las etiquetas recogidas en la **Tabla 3.6**. La descripción cualitativa de la metodología *crisp* en realidad es una descripción cuantitativa basada en números enteros.

Tabla 3.6. Caracterización cualitativa de los efectos

NA: NATURALEZA		IN: INTENSIDAD	
(+) Beneficioso	+1	(B) Baja	1
(-) Perjudicial	-1	(M) Media	2
		(A) Alta	4
		(MA)Muy Alta	8
		(T) Total	12
EX: EXTENSIÓN		MO: MOMENTO	
(Pu)Puntual	1	(L) Largo plazo	1
(Pa)Parcial	2	(M)Medio Plazo	2
(E) Extenso	4	(I) Inmediato	4
(T) Total	8	(C)Crítico ⁽²⁾	+4
(C) Crítico ⁽¹⁾	+4		
PE: PERSISTENCIA		RV: REVERSIBILIDAD	
(F) Fugaz	1	(C) Corto Plazo	1
(T) Temporal	2	(M) Medio Plazo	2
(P) Permanente	4	(I) Irreversible	4
SI: SINERGISMO		AC: ACUMULACIÓN	
(SS) Sin sinergismo	1	(S) Simple	1
(S) Sinérgico	2	(A) Acumulativo	4
(MS) Muy sinérgico	4		
EF: RELACIÓN CAUSA-EFECTO		PR: PERIODICIDAD	
(I) Indirecto (secundario)	1	(I) Irregular o aperiódico y discontinuo	1
(D)Directo (primario)	4	(P) Periódico	2
		(C) Continuo	4
MC: RECUPERABILIDAD		I: IMPORTANCIA	
(In) De manera inmediata	1	Irrelevante	
(MP)A medio plazo	2	Moderado	
(M)Mitigable	4	Severo	
(I)Irrecuperable	8	Crítico	

¹⁾ Si el área cubre un lugar crítico (especialmente importante) la valoración será cuatro unidades superior

⁽²⁾ Si el impacto se presenta en un momento (crítico) la valoración será cuatro unidades superior.

Naturaleza (NA)

Hace referencia al carácter beneficioso o perjudicial del Impacto.

Intensidad (IN)

Expresa el grado de incidencia de la acción sobre el factor, que puede considerarse desde una afección mínima hasta la destrucción total del factor.

Extensión (EX)

Representa el área de influencia esperada en relación con el entorno del proyecto, que puede ser expresada en términos porcentuales. Si el área está muy localizada, el impacto será *puntual*, mientras que si el área corresponde a todo el entorno el impacto será *total*.

Momento (MO)

Se refiere al tiempo que transcurre entre el inicio de la acción y el inicio del efecto que ésta produce. Puede expresarse en unidades de tiempo, generalmente años, y suele considerarse que el *Corto Plazo* corresponde a menos de un año, el *Medio Plazo* entre uno y cinco años, y el *Largo Plazo* a más de cinco años.

Persistencia (PE)

Se refiere al tiempo que se espera que permanezca el efecto desde su aparición. Puede expresarse en unidades de tiempo, generalmente años, y suele considerarse que es *Fugaz* si permanece menos de un año, el *Temporal* si lo hace entre uno y diez años, y el *Permanente* si supera los diez años.

La *persistencia* no es igual que la *reversibilidad* ni que la *recuperabilidad*, conceptos que se presentan más adelante, aunque son conceptos asociados: Los efectos fugaces o temporales siempre son reversibles o recuperables; los efectos permanentes pueden ser reversibles o irreversibles, recuperables o irrecuperables.

Reversibilidad (RV)

Se refiere a la posibilidad de reconstruir el factor afectado por medios naturales, y en caso de que sea posible, al intervalo de tiempo que se tardaría en lograrlo que si es de menos de un año se considera el *Corto plazo*; entre uno y diez años se considera el *Medio plazo*, y si se superan los diez años se considera *Irreversible*.

Sinergia (SI)

Se dice que dos efectos son sinérgicos si su manifestación conjunta es superior a la suma de las manifestaciones que se obtendrían si cada uno de ellos actuase por separado (la manifestación no es lineal respecto a los efectos). Puede visualizarse como el reforzamiento de dos efectos simples; si en lugar de reforzarse los efectos se debilitan, la valoración de la sinergia debe ser negativa.

Acumulación (AC)

Si la presencia continuada de la acción produce un efecto que crece con el tiempo, se dice que el efecto es *acumulativo*.

Relación Causa-Efecto (EF)

La relación causa-efecto puede ser directa o indirecta: es *Directa* si es la acción misma la que origina el efecto, mientras que es *indirecta* si es otro efecto el que lo origina, generalmente por la interdependencia de un factor sobre otro.

Periodicidad (PR)

Se refiere a la regularidad de la manifestación del efecto, pudiendo ser periódico, continuo, o irregular.

Recuperabilidad (MC)

Se refiere a la posibilidad de reconstruir el factor afectado por medio de la intervención humana (la *reversibilidad* se refiere a la reconstrucción por medios naturales).

Análisis Cualitativo Global

Una vez calculada la Importancia de cada uno de los Impactos, y consignados estos valores en la Matriz de Importancia, se procede al análisis del proyecto en su conjunto; para ello se efectúa, como paso preliminar, una *depuración* de la matriz, en la que se eliminan aquellos impactos :

- Irrelevantes, es decir aquellos cuya importancia está por debajo de un cierto valor umbral

- Que se presentan sobre factores intangibles para los que no se dispone de un indicador adecuado. La metodología crisp especifica que estos efectos deben contemplarse en forma separada, pero pese a ello no se aclara en qué forma debe hacerse; estos efectos no se incluyen en la matriz depurada porque la metodología crisp no tiene herramientas adecuadas para su análisis.
- Extremadamente severos, y que merecen un tratamiento específico. Generalmente se adoptan alternativas de proyecto en donde no se presenten estos casos, por esta razón al eliminarlos no se está sesgando el análisis cualitativo global.

El paso siguiente es la *valoración cualitativa del Impacto Ambiental Total*, que se obtiene mediante un análisis numérico de la Matriz de Importancia depurada consistente de sumas, y sumas ponderadas por UIP de las importancias. Las sumas se realizan por filas y por columnas. Nuevamente se observa que la *valoración cualitativa* de la metodología *crisp* consiste en un tratamiento cuantitativo basado en números enteros. La suma ponderada por columnas permitirá identificar las acciones más agresivas (valores altos negativos), las poco agresivas (valores bajos negativos) y las beneficiosas (valores positivos). Las sumas ponderadas por filas permitirán identificar los factores más afectados por el proyecto. Al comparar los resultados que se obtienen en *situaciones* diferentes, podrá hacerse una valoración cualitativa de las distintas alternativas de proyecto.

A continuación se recogen algunos de los indicadores que suelen emplearse para estimar el impacto simultáneo de varios efectos. Se ha supuesto una matriz de n factores m acciones, y donde I_{ij} es la importancia del impacto de la acción j sobre el factor i , cuya importancia relativa al entorno es P_{ij} , como en la **Tabla 3.5**:

Importancia de los efectos debidos a la acción A_j :
$$I_{A_j} = \sum_{i=1}^n I_{ij}$$

Importancia de los efectos sufridos por el factor F_i :
$$I_{F_i} = \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

Importancia relativa al entorno de los efectos debidos a la acción A_j : $I_{R-A_j} = \sum_{i=1}^n P_i I_{ij}$

Importancia relativa al entorno de los efectos sufridos por el factor F_i :

$$I_{R-F_i} = \sum_{j=1}^m P_i I_{ij} = P_i \sum_{j=1}^m I_{ij}$$

Importancia Total del proyecto : $I_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}$

Importancia Total del proyecto relativa al entorno: $I_{R-T} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i I_{ij}$

Valoración Cuantitativa

En la fase de *Valoración Cuantitativa*, la información obtenida en la *Valoración Cualitativa* se complementa con estudios técnicos más detallados; estos estudios deben permitir hacer una predicción numérica de cada uno de los impactos individuales (a diferencia de la predicción lingüística empleada en la fase previa), que luego deberá agruparse para obtener una predicción numérica del impacto total.

Esta predicción numérica se transforma en unas variables intangibles adimensionales denominadas *Calidad Ambiental* y *Valor Ambiental* que, por ser intangibles, deberían ser tratadas de forma *cualitativa*. Sin embargo, la metodología *crisp* no cuenta con las herramientas adecuadas para ello.

Indicadores ambientales y Magnitud de los impactos

Un *Indicador de un factor ambiental* es una variable que permite medir dicho factor. En algunas ocasiones la determinación del indicador adecuado para un factor es más o menos obvia (por ejemplo para el factor *Fosfatos en el agua* el indicador será la *concentración de fósforo en el agua*), pero en muchas otras no lo es, principalmente por dos razones:

- El factor sólo es cuantificable de forma indirecta, en cuyo caso pueden existir varios indicadores candidatos para medir un mismo factor.
- No se encuentra un indicador cuantificable, y es necesario recurrir a parámetros cualitativos, que pueden ser valorados subjetivamente.

Las unidades de medida de cada indicador estarán determinadas por el propio indicador, y por lo tanto cada factor será medido en unidades diferentes; como consecuencia, no podrá realizarse una comparación entre dos factores basándose para ello exclusivamente en las medidas de sus indicadores.

La *Magnitud* de un impacto es la estimación cuantitativa del efecto que éste tendrá sobre el factor ambiental, medida según el valor que se espera que tome el indicador de dicho factor. Esta estimación debe ser desarrollada por especialistas en el factor correspondiente, y generalmente está apoyada en modelos matemáticos del sistema físico estudiado. La magnitud del impacto suele registrarse en la misma matriz de importancia.

Agregación de Magnitudes por Efecto

Un mismo factor puede ser impactado simultáneamente por varias acciones. La magnitud del impacto total recibido por ese factor es la *Agregación* de las magnitudes de los impactos individuales. De lo anterior se desprende que:

$$M_i = A_{gi}(M_{i1}, \dots, M_{ij}, \dots, M_{im})$$

donde:

- M_i es la magnitud del impacto total recibido por el factor F_i ,
- M_{ij} la magnitud del impacto producido por la acción A_j sobre el Factor F_i ,
- A_{gi} es la función de agregación del factor F_i , y se han supuesto m acciones impactantes.

La forma de la función de agregación A_{gi} depende del factor considerado.

Calidad Ambiental y Funciones de Transformación

Mediante las funciones de agregación se puede obtener la magnitud del impacto total recibido por cada factor, pero este impacto estará medido en las unidades características de cada factor, y por lo tanto no es posible comparar los impactos recibidos por factores diferentes.

Para poder hacer esa comparación, se emplean las *Funciones de Transformación*, que permiten referir a una escala común, denominada *Calidad Ambiental*, las magnitudes de los impactos recibidos por cada factor. Las funciones de transformación son de la forma.

$$CA_i = U_i \rightarrow [0,1]$$

donde:

- CA_i es la función de transformación del factor F_i ,
- U_i es el espacio sobre el que están medidas la magnitudes de los impactos recibidos por el factor F_i , y
- $[0,1]$ es el intervalo unitario, en el que se medirá la *Calidad Ambiental* (adimensional).

Se asigna el valor 0 a la situación ambiental más desfavorable, y 1 a la situación óptima.

La forma de la función CA_i dependerá del factor considerado, y su determinación es una de las tareas más complejas de la Evaluación de Impacto Ambiental, ya que las propuestas sobre la forma de medir la *Calidad Ambiental* puede variar sensiblemente de un autor a otro.

El Impacto causado por el proyecto sobre un factor determinado puede medirse empleando la noción de *Calidad Ambiental Neta*, que se define como la diferencia en la calidad ambiental asociada a ese factor en dos situaciones diferentes: *Con* el proyecto y *Sin* el proyecto. La forma de calcularla es la siguiente:

$$CA_{neta-i} = CA_{con-i} - CA_{sin-i}$$

$$CA_{con-i} = CA_i(M_{con-i})$$

$$CA_{sin-i} = CA_i(M_{sin-i})$$

donde:

- CA_{neta-i} es la calidad ambiental neta del factor F_i ;
- CA_{con-i} es la calidad ambiental del factor F_i con el proyecto y
- CA_{sin-i} sin él;
- CA_i es la función de transformación del factor F_i ;
- M_{con-i} y M_{sin-i} son las magnitudes del impacto total recibido por el factor F_i con el proyecto y sin él respectivamente.

Valor del Impacto sobre un Factor

El *Valor* del impacto recibido por un factor determinado es una medida que combina la *importancia* y la *calidad ambiental neta* de ese impacto. Se calcula como:

$$|V_i| = (a_i b_i)^{1/3}$$

$$a_i = \frac{|I_{F_i}|}{\max(|I_{F_k}|)}$$

$$b_i = (CA_{neta-i})^2$$

$$\text{sig}(V_i) = \text{sig}(I_{F_i})$$

donde:

- V_i denota el valor del impacto recibido por el factor F_i ,
- I_{F_i} es la importancia de ese impacto y
- CA_{neta-i} es su calidad ambiental neta;
- a_i y b_i son variables auxiliares; y además
- $|\cdot|$ y $\text{sig}(\cdot)$ son los operadores de valor absoluto y signo respectivamente.

Tanto a_i como b_i pueden tomar valores en el intervalo $[0,1]$, y por lo tanto V_i tomará valores en el intervalo $[-1,1]$

Análisis Cuantitativo global

El *Impacto Ambiental Total (IAT)* se calcula como la suma ponderada de los valores de los impactos recibidos por cada factor, donde la ponderación se hace mediante las unidades de importancia (*UIP*) de cada factor; así pues,

$$IAT = \sum_{i=1}^n P_i V_i$$

donde:

- IAT* es el Impacto Ambiental Total,
- P_i son las unidades de importancia del factor F_i y
- V_i es el valor del impacto recibido por el mismo factor F_i .

El *IAT* estima globalmente lo severo que es el efecto del proyecto sobre el medio ambiente. Como la suma de todos los factores de ponderación P_i es 1000, entonces el *IAT* puede tomar valores en el intervalo $[-1000,+1000]$, siendo los proyectos más severos aquellos cuyo Impacto Ambiental Total se acerque a -1000 , y los más beneficiosos aquellos que se acerque a $+1000$.

El *IAT* debe calcularse para las distintas alternativas que se consideren, incluyendo el efecto de las medidas correctoras que se incorporen en cada caso. Mediante la comparación directa entre los *IAT* de distintas alternativas se podrá determinar cuál de ellas es la mejor desde el punto de vista de su impacto ambiental (Enea and Salemi, 2001)

Crítica a la metodología convencional (crisp) de EIA

La metodología crisp logra, en alguna medida, satisfacer los requerimientos de una Evaluación de Impacto Ambiental; sin embargo, al analizarla se evidencian algunas flaquezas, como las siguientes:

1. La “valoración cualitativa” utiliza variables cuantitativas: En efecto, en el cómputo de la Importancia se emplean etiquetas para caracterizar variables que son claramente cuantificables, como son la *Extensión* (cuantificable en porcentaje de

área respecto al entorno), o el *Momento*, la *Persistencia* y la *Reversibilidad*, (cuantificables en meses). Es de anotar que estas variables numéricas primero se convierten en variables no-numéricas (por ejemplo el Momento se evalúa como *inmediato*, *a medio plazo* o *a largo plazo*), para luego volver a convertirse en variable numérica mediante la asignación de un número asociado a cada etiqueta.

2. La “valoración cualitativa” es realmente cuantitativa: La valoración cualitativa consiste en seleccionar unas etiquetas para cada variable, asignarle un valor numérico a cada etiqueta, y luego efectuar sumas y promedios con esos número. Dicho de otro modo, la valoración cualitativa es en realidad una serie de operaciones sobre variables definidas en la recta entera, ya que en el fondo lo único que se hace es representar los posibles valores de las variables como un conjunto de valores numéricos discretos. Puede decirse, por tanto, que el modelo lingüístico de la valoración cualitativa se define sobre números enteros.
3. La “valoración cuantitativa” utiliza variables cualitativas: Las Funciones de Transformación CA_i se apoyan en el concepto de *Calidad ambiental*, que es intangible y por lo tanto necesariamente no cuantificable. Por esta misma razón, la forma de las funciones de transformación puede considerarse como subjetiva. Otro tanto puede afirmarse del *Valor* del impacto ambiental, que tampoco es una magnitud medible.
4. No se modela la incertidumbre: Pese a que es de esperar que algunas variables no se puedan determinar con absoluta precisión, la metodología no establece ningún procedimiento para tratar variables con incertidumbre.
5. No hay estrategias para caracterizar las medidas correctoras: Las medidas correctoras se pueden incorporar en las distintas matrices, pero la metodología no contempla ninguna estrategia para ayudar al usuario a establecer cómo deben ser.
6. Las diferencias en las escalas distorsionan los pesos de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia: A juzgar por la ecuación que permite calcular la Importancia de un impacto, la *Intensidad* del mismo pesa 3 veces más (y la *Extensión* 2 veces más) que la mayoría de las demás variables. Estas proporciones, no obstante, están falseadas debido a las diferentes escalas empleadas para valorar cada variable: mientras la *Intensidad* puede llegar a valer 12 unidades, la *Acumulación* solo puede alcanzar 4, con lo que la proporción real del peso que tienen estas dos variables es de 9:1. Teniendo en cuenta el efecto de las escalas, e ignorando la variable *Naturaleza* que determina el signo pero no el

valor absoluto de la Importancia, el peso que tiene cada una de las variables en la ecuación de Importancia es:

<i>Intensidad:</i>	36%	<i>Sinergia:</i>	4%
<i>Extensión:</i>	24%	<i>Acumulación:</i>	4%
Momento:	8%	Efecto:	4%
<i>Persistencia:</i>	4%	<i>Periodicidad:</i>	4%
<i>Reversibilidad:</i>	4%	<i>Recuperabilidad:</i>	8%

Vale la pena resaltar que, de las deficiencias arriba anotadas, las tres primeras se deben a que la metodología *crisp* no logra manipular simultáneamente de forma adecuada información numérica (cuantitativa) y lingüística (cualitativa). La cuarta y quinta deficiencias son carencias de la metodología, mientras que la última aparece al no homogeneizar la escala de las variables.

3.3.3 Evaluación Difusa del Impacto Ambiental

Del apartado anterior se concluye que el manejo de la información lingüística en la metodología convencional (*crisp*) es bastante deficiente, especialmente porque está basado en números enteros. Este hecho sugiere que la metodología se mejoraría significativamente si se construyese sobre un modelo lingüístico más adecuado. Por esta razón se propone la utilización de técnicas difusas.

Mediante *variables lingüísticas* puede obtenerse una representación matemática adecuada de conceptos *vagos*, es decir, de conceptos que no pueden delimitarse por fronteras exactas; muchas de las variables que se emplean en los estudios de impacto ambiental son de este tipo, lo que sugiere que sean modeladas mediante variables lingüísticas.

En efecto, la variable *Importancia* de un impacto se califica como Irrelevante, Moderada, Severa o Crítica, y aunque cada una de esas etiquetas tiene un contenido semántico claro, no hay una diferencia nítida entre cada una de ellas.

Esta clasificación adolece del mismo problema que adolecen todas las clasificaciones intervalares de conceptos vagos: supóngase dos impactos cuyos índices de importancia sean 50 y 51, respectivamente ¿podemos realmente considerar que sean tan diferentes como para asignarles dos etiquetas diferentes (“moderado” y “severo”)?

Si, por el contrario, definimos la importancia de un impacto mediante una variable lingüística con las mismas cuatro etiquetas, pero representadas, por ejemplo, por los conjuntos difusos que se muestran en la **Figura 3.3**, se eliminarían estos cambios bruscos.



Figura 3.3. Ejemplo de variable lingüística para la importancia de un impacto

Dentro de las variables involucradas en los estudios de impacto ambiental, la *Importancia* no es la única que se define con conceptos vagos; todo lo contrario, la gran mayoría de ellas lo son: Las variables de la **Tabla 3.6**, *Intensidad*, *Sinergia*, etc., están definidas sobre conceptos vagos (*Intensidad baja*, *muy sinérgico*, etc); y aún las variables empleadas en la “valoración cuantitativa” *Calidad Ambiental*, *Valor de un Impacto*, se representan mejor con variables lingüísticas.

Sin embargo, existen otras variables cuya representación con números naturales (*crisp*) parecería, al menos en principio, adecuada. Tal es el caso de la *magnitud* de un impacto, que se mide empleando indicadores asociados a los factores impactados (por ejemplo la concentración de óxidos de azufre en el aire). En todo caso, no hay que olvidar que en los estudios de impacto ambiental se efectúa una predicción que puede ser imprecisa. En estos casos la representación *crisp* es insuficiente para modelar la *imprecisión*.

Además, aún la magnitud de un impacto puede estar definida de forma vaga, ya que para algunos factores ambientales no es posible encontrar un indicador medible (por ejemplo para el *valor histórico del entorno*).

Por su parte, los *números difusos*, que son un subconjunto *crisp* de los *conjuntos difusos*, permiten modelar adecuadamente valores numéricos en los que exista incertidumbre. Esta es una justificación más para proponer la incorporación de técnicas difusas en los estudios ambientales.

Debe decirse también, que los número difusos son una extensión de los números *crisp*, de tal manera que al remplazar números *crisp* por números difusos en los estudios ambientales, aquellas variables cuya representación *crisp* sea adecuada, podrán seguir siendo representadas de esa forma.

La propuesta consiste, entonces, en modificar la metodología *crisp* en varios sentidos, principalmente:

- Representar las variables involucradas como *variables lingüísticas*.
- Permitir que los valores asignados a cada variable sean lingüísticos (conceptos *vagos*) o numéricos (incluyendo *imprecisiones*); es decir, permitir que los valores asignados a cada variable sean *números difusos*.
- Se propone también desarrollar una estrategia que permita caracterizar la importancia que deben tener las acciones correctoras que deben incorporarse en el proyecto.

En otras palabras, se propone utilizar una *Metodología Difusa* para la Evaluación del Impacto Ambiental. Con este propósito se plantea la aplicación de un *sistema de computación con palabras basados en aritmética difusa* que pueda definir sistemas de una gran cantidad de entradas y calcular las entradas del sistema (o al menos unas de ellas) a partir de las salidas que sirva para caracterizar las medidas correctoras.

Estos sistemas emplean una función *crisp* que se extiende a números difusos y para efectuar el razonamiento inverso emplean sus funciones inversas. Estos algoritmos

son de aplicabilidad general y su utilidad no se restringe al modelo de computación con palabras.

Método Difuso

La metodología difusa se ha basado en la metodología convencional (*crisp*) mostrada en el apartado 3.3.2, y por tanto puede considerarse como una extensión de ésta. Sin embargo, la extensión se ha concebido en forma tal, que realmente cubre otras metodologías similares.

Al igual que en la metodología *crisp*, en la metodología difusa se distinguen dos fases, denominadas *Valoración Aproximada* (o de *granularidad gruesa*) y *Detallada* (o de *granularidad fina*). El cambio de nombre responde a las observaciones según las cuales ambas fases tienen componentes cualitativos y cuantitativos, con lo que las denominaciones originales no son del todo acertadas.

Valoración difusa aproximada

La etapa de *Valoración Aproximada* es la extensión de la etapa de *valoración cualitativa* de la metodología *crisp*, y por tanto, los pasos a seguir en esta etapa son semejantes:

- a) Describir el medioambiente como un conjunto de *factores medioambientales*.
- b) Describir la actividad que se evalúa como un conjunto de *acciones*.
- c) Identificar los *impactos* que cada *acción* tiene sobre cada *factor medioambiental*.
- d) Caracterizar cada *impacto* mediante la estimación de la *Importancia* de cada uno de ellos.
- e) Analizar la *importancia* global de la actividad sobre el medio, utilizando para ello las *importancias* individuales de cada *impacto*.

a) Identificación de Factores Ambientales.

Para la representación del entorno medioambiental se propone una estructura jerárquica; debido a que no todos los autores coinciden respecto al número de niveles

que debe tener el árbol, se propone que sea el usuario quien defina cuántos niveles debe tener, y el nombre asociado a cada nivel.

Un ejemplo de árbol de factores es el siguiente:

- ✓ Entorno medioambiental
 - Sistemas ambientales
 - Subsistemas ambientales
 - Componentes ambientales
 - Factores ambientales

A cada factor se le debe asignar una medida de su importancia relativa al entorno, medida en *Unidades de Importancia (UIP)*, y la suma de todas las *UIP* debe ser 1000. Para facilitar la tarea de asignación de estos pesos, se sugiere iniciar el proceso por el nodo superior del árbol, asignando 1000 UIP al entorno, y luego definir los pesos de los nodos inferiores como un porcentaje del peso del nodo inmediatamente superior.

b) Identificación de Acciones del Proyecto

Se propone representar las acciones mediante un árbol jerárquico cuyo número de niveles los define el usuario. Un ejemplo de árbol de acciones es el empleado con cuatro niveles:

- ✓ Actuación sobre el entorno
 - Situaciones
 - Actividades
 - Acciones

c) Identificación de los efectos sobre el medio ambiente.

Una vez identificados los factores del medio y las acciones, se procede a identificar los *impactos* que cada *acción* tiene sobre cada *factor medioambiental*. Cada relación causa-efecto identifica un impacto potencial cuya significación habrá que estimar después.

Existen algunas técnicas para identificar estas relaciones causa-efecto, tal es el caso de los cuestionarios generales o específicos, los escenarios comparados, las entrevistas en profundidad con expertos y la consulta a paneles de expertos representativos de los grupos de interés social afectados por el proyecto.

d) Determinación de la Importancia Difusa de los Impactos

Se propone la utilización de un Sistema de Computación con Palabras basado en aritmética difusa. Cada impacto puede ser calculado con un sistema diferente, de esta forma cada grupo de expertos podrá emplear las variables que considere necesarias y definir las de forma independiente a los demás grupos. Se ha propuesto emplear sistemas basados en aritmética difusa, y no en lógica difusa, debido a la gran cantidad de variables de entrada.

Los sistemas para el cálculo de la importancia de los impactos tendrán en común las siguientes características:

- ✓ Cada variable de entrada podrá definirse sobre un intervalo cualquiera de la recta real $[a_i, b_i]$.
- ✓ Internamente, el sistema efectuará un cambio de escala de los valores de entrada del intervalo $[a_i, b_i]$ al intervalo $[0, 1]$.
- ✓ La variable de salida del sistema será la *Importancia del Impacto*, y estará representada sobre el universo de discurso $[0, 1]$.
- ✓ Las variables lingüísticas de las entradas y de la salida deberán ser definidas por el usuario, atendiendo a las recomendaciones.
- ✓ La *Naturaleza* del impacto (si es Beneficioso o perjudicial) no será una de las variables de entrada, ya que ésta se empleará en el *Análisis Aproximado Global*.
- ✓ La función de razonamiento aproximado del sistema será:

$$fra : y = \sum_{i=1}^n f_i w_i g_i(x_i) + \sum_{i=1}^n (1 - f_i) w_i g_i(1 - x_i)$$

Donde:

- fra* es una suma ponderada en la que se han supuesto n entradas;
- x_i* es la entrada número i ,
- w_i* es el peso que está entre 0 y 1,

f_i es un parámetro que vale 0 ó 1
 $g_i(x_i)$ es una función de $[0,1]$ en $[0,1]$ monótonamente creciente

$$g(x_i) = (x_i)^{\theta_i}$$
con θ_i , un exponente seleccionado por el usuario, y que representa qué tan rápido crece la importancia de un efecto cuando crece la variable i .
Se emplea $\theta_i=2$ como valor por defecto.

- ✓ El valor del peso w_i para cada variable de entrada en la función de razonamiento aproximado será determinado por el usuario, atendiendo a las recomendaciones.

e) Análisis aproximado difuso global

Una vez que se ha determinado la Importancia Difusa de cada uno de los impactos, se procede al Análisis aproximado global. En esta etapa se calculan algunos *Índices* difusos, que serán empleados por el evaluador para determinar si el proyecto es compatible o no con el medio ambiente.

Para ello, denotaremos por *IMP* a un vector que contiene q Importancias Difusas:

$$IMP = [\#I_1 \ \#I_2 \ \dots \ I_q]$$

Cada una de las importancias difusas $\#I_k$ corresponde al impacto de una cierta acción A_k sobre un cierto factor F_k ; F_k tiene un peso P_k (un número entre 0 y 1 que mide la importancia del factor respecto al entorno). Este vector puede estar formado por todas las Importancias Difusas del proyecto, por los impactos recibidos por un factor F_i , o por los impactos producidos por una acción A_j . Vectores similares pueden formarse para cada uno de los niveles de los árboles con los que se representan los factores y las acciones (por ejemplo con los *componentes ambientales, subsistemas ambientales, sistemas ambientales, entorno, actividades y situaciones*).

Los *Índices difusos* que se proponen se calculan con sistemas de computación con palabras basados en aritmética difusa, que tienen las siguientes características:

- ✓ Las entradas al sistema representan Importancias difusas, y la salida es un Indicador difuso; se sugiere asociar a la salida una variable lingüística con siete etiquetas: *Extremadamente Perjudicial*, *Muy Perjudicial*, *Perjudicial*, *Irrelevante*, *Beneficioso*, *Muy Beneficioso* y *Extremadamente Beneficioso*.
- ✓ El número de entradas, q , no es fijo, sino que el sistema se adecua para cada valor de q .
- ✓ Operan sobre un vector *IMP* de q Importancias Difusas. Es posible que para algunos impactos no se haya podido calcular su importancia difusa con el procedimiento del inciso anterior. En estos casos la importancia difusa se caracterizará por: un número *crisp*, un intervalo, una restricción difusa o una palabra (que puede ser *CUALQUIER COSA*).
- ✓ La salida tiene una relación creciente con todas las entradas.
- ✓ Aunque las Importancias difusas han sido obtenidas sobre el intervalo $[0,1]$, las variables lingüísticas asociadas a las entradas están definidas sobre el intervalo $[-1,1]$; esta aparente incongruencia se debe a que cada entrada recibe un preprocesamiento en donde interviene la variable *Naturaleza del impacto*.
- ✓ Los indicadores difusos propuestos difieren en la *fra* con que se calculan, y en el intervalo sobre el que están definidos.

Valoración Difusa Detallada

La *Valoración Detallada* es el equivalente a la etapa de *valoración cuantitativa* de la metodología *crisp*; en esta etapa se busca determinar el *Valor del Impacto Total* mediante un procedimiento que consta de los siguientes pasos:

- ✓ Para cada factor F_i , los expertos determinan su estado *sin* el proyecto, y lo reflejan en las unidades propias del factor. Esta variable se denomina *Magnitud del factor F_i sin el proyecto*, o simplemente M_{sin-i} y podrá ser expresado como un número *crisp*, un intervalo, un número difuso, o con palabras.
- ✓ Para cada impacto de una acción A_j sobre un factor F_i , los expertos determinan cómo se afecta el factor impactado F_i , y lo reflejan en las unidades propias del factor. Esta variable se denomina *Magnitud del impacto de la acción A_j sobre el*

factor F_i , o simplemente M_{ij} y podrá ser expresado como un número crisp, un intervalo, un número difuso, o con palabras.

- ✓ Para cada factor F_i , se obtiene la *Magnitud Total del Factor F_i con el proyecto* o simplemente M_{con-i} , mediante un sistema de computación con palabras cuyas entradas son el conjunto de todas las magnitudes M_{ij} correspondientes a ese factor.
- ✓ Para cada factor F_i , se obtiene la *Calidad Ambiental del Factor F_i con el proyecto*, CA_{con-i} , y la *Calidad Ambiental del Factor F_i sin el proyecto*, CA_{sin-i} , mediante un mismo sistema de computación con palabras cuyas entradas son M_{con-i} y M_{sin-i} respectivamente.
- ✓ Para cada factor F_i , se obtiene la *Calidad Ambiental Neta del Factor F_i* , CA_{neta-i} , mediante un sistema de computación con palabras cuyas entradas son CA_{con-i} y CA_{sin-i} .
- ✓ Para cada factor F_i , se obtiene el *Valor del Impacto ambiental $IAD_i=V_i$, sobre el Factor F_i* , mediante un sistema de computación con palabras cuyas entradas son la Importancia I_i y la calidad ambiental neta de cada factor CA_{neta-i} . El factor pe indica el peso de la importancia con respecto a la calidad ambiental

$$IAD_i = V_i = f(I_i, CA_i) = pe * I_i + (1 - pe) * CA_i$$

- ✓ Se obtiene el *Valor del Impacto Ambiental Total Difuso sobre el Entorno*, $IADT$, mediante un sistema de computación con palabras cuyas entradas son el conjunto de todos los $IAD_i=V_i$.

$$IADT = \sum_{i=1}^n IAD_i$$

Determinación de medidas correctoras según la valoración aproximada

El propósito de este apartado es mostrar una estrategia para calcular cómo debe ser la *Importancia* de un conjunto de impactos individuales, para que un *Índice* esté incluido dentro de los límites “aceptables”, establecidos por el usuario de la metodología.

Dicho de otra forma, se busca caracterizar las medidas correctoras que deben tomarse para poder “aprobar” un proyecto, según la valoración aproximada. Esta caracterización se realiza mediante la estimación de la *Importancia* del impacto corregido; corresponderá al grupo de expertos el determinar si es técnica y económicamente posible efectuar esa corrección.

Los *Índices* de la valoración aproximada se obtienen mediante Sistemas de Computación con Palabras basados en aritmética difusa; se propone efectuar la caracterización de las medidas correctoras aprovechando que con estos sistemas se puede efectuar *razonamiento inverso*.

El razonamiento inverso emplea el algoritmo de *Extensión Necesaria*, por lo cual es indispensable que la *fra* (función de razonamiento aproximado) del sistema de computación con palabras sea estrictamente monótono.

Para la estimación de las medidas correctoras se cuenta con un vector de importancias difusas $IMP = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_q]$, con los que se ha calculado un cierto *índice* y el resultado ha sido IND . Se desea ahora, modificar algunos de los componentes del vector IMP , para que el nuevo índice sea IND^* .

En primera instancia se presenta la estrategia a seguir para estimar las medidas correctoras, cuando sólo se desea modificar un impacto, y luego se amplía al caso más general en que se modifican varios impactos. La estrategia es la siguiente:

- ✓ Seleccionar el impacto que desea modificarse. Se denominará su importancia antes de la corrección como I_c , y después de la corrección como I_c^* , dando a entender que corresponde al elemento número c del vector IMP .
- ✓ Construir un sistema de razonamiento inverso como el que se muestra en la **Figura 3.4** basado en la *fra* del índice correspondiente, y para el elemento c .
- ✓ Especificar el valor que se desea que tome el índice seleccionado IND^* . Este valor podrá ser especificado mediante un número crisp, un intervalo, un número difuso, o mediante palabras.

- ✓ Obtener el valor de $\#I_c^*$ empleando como entradas del sistema de razonamiento inverso el vector IMP sin la componente $\#I_c$ y el valor deseado del Índice $\#IND^*$.
- ✓ _ Verificar cuál es el valor del índice que se obtiene con la modificación. Este valor no necesariamente es $\#IND^*$, ya que el algoritmo de extensión necesaria puede modificarlo (es la salida 'y' en la **Figura 3.4**).

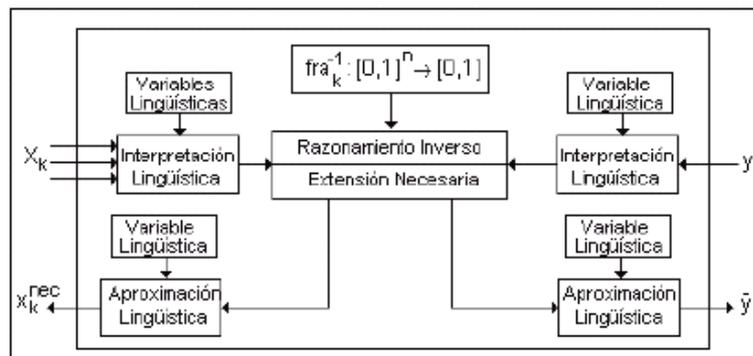


Figura 3.4. Razonamiento inverso en un sistema de computación con palabras

Evaluación Multicriterio de Alternativas

Es importante que todo proyecto tenga distintas alternativas de ejecución, como por ejemplo distintos trazados de una carretera o diferentes métodos de obtención de un producto, etc.. El proceso de elección de la mejor alternativa estaría condicionado por el conjunto de metas y objetivos fijados en el proyecto (criterios de selección).

El proceso multicriterio de evaluación de alternativas comprende las siguientes fases (Martín-Ramos, 2003):

- *Selección de Criterios* respecto a los cuales se valorarán las alternativas. Estos criterios pueden ser de carácter económico (Coste de ejecución, Coste Medidas Correctoras, Rentabilidad Económica), sociales, eficiencia ambiental (Importancia del Impacto, Magnitudes de los efectos), y cualquier información del estudio de impacto ambiental que resulte útil.

- *Valoración de las Alternativas*, de acuerdo con cada uno de los criterios establecidos, se obtiene esta información ya sea de los distintos estudios o bien de información contenida en la propia EIA.
- *Asignación de Pesos*. Determinar la importancia relativa de cada criterio de selección en el proceso de elección de la mejor o mejores alternativas de ejecución del proyecto.
- *Determinación del Método de Decisión*. Escoger el método entre el conjunto de métodos multicriterio difusos disponibles.
- *Obtención de Parámetros*. Determinación según el método, de los parámetros necesarios para su aplicación como por ejemplo, el umbral de concordancias, funciones de preferencia por cada criterio, etc. Estos parámetros deben ser proporcionados por el tomará la decisión.
- *Obtención de la Información*. Una vez aplicado el método de decisión multicriterio, se obtendrá la mejor, las mejores o una ordenación del conjunto de alternativas de ejecución.
- *Proceso de Estudio y Análisis*. El decisor analizar la ayuda que proporciona los métodos de decisión, y puede elegir entre:
 - Escoger que una alternativa determinada.
 - Modificar los parámetros y pesos, para obtener más ayuda al problema de decisión.
 - Modificar los criterios de selección.
 - Escoger otro método de decisión multicriterio.
 - Empezar por completo determinando los criterios de selección.

El proceso de Toma de Decisión comienza con la creación o importación del conjunto de variables difusas que serán asociadas a cada criterio de decisión, lo que nos permite valorar distintos criterios a través de una misma variable difusa.

Se pasa enseguida a la estructura de la matriz de decisión difusa. Para ello se definen el conjunto de alternativas y criterios de selección exactamente de la misma forma en que se definió la estructura de la matriz de importancia (Acciones del proyecto y Factores ambientales).

Después de crear la estructura, se llenan los campos de la matriz de decisión. Una vez llenas todas las celdas de la matriz de decisión, se elige el método multicriterio que se aplicará el cual se ejecuta de manera automática, en nuestro caso se puede elegir entre Promethee Difuso, Electre I y Electre II Difuso, mostrando su desarrollo en el conjunto de tablas de resultados entre las que se incluyen: la tabla de información de criterios, la matriz de decisión, la matriz π , la matriz de sobreclasificación y un diagrama que nos indica el orden final de las alternativas de acuerdo con el método multicriterio seleccionado.

La información que el software de decisión multicriterio necesita para los métodos multicriterio implementado es:

- El conjunto de criterios de selección distribuidos por columnas.
- El Tipo de los criterios. En el caso de que sea *crisp*, habría que especificar el universo de donde toma valores. En el caso de que sea difuso, hay que especificar la variable lingüística de la que tomará valores.
- El objetivo de cada criterio de selección cuyos únicos valores son *maximizar* y *minimizar*.
- Los pesos, incluidos el tipo (*crisp* o difuso) y los valores seleccionados para cada criterio de selección.
- Tipo de preferencia. Este campo solo se utiliza para el método Promethee Difuso. Los métodos Electre Difusos no tiene definido este parámetro. En este caso se seleccionara un tipo de función entre las 6 que la familia de métodos FPromethee utiliza para modelizar las preferencias del decisor.
- Umbrales de Preferencia e Indiferencia. Dependiendo del tipo de preferencia seleccionada en los criterios, las celdas se activan o no.

El resto de matrices implementadas son de tamaño $n \times n$, donde n es el número de alternativas definidas. Estas matrices contendrán las distintas valoraciones de cada alternativa, en términos de los valores que los criterios pueden tomar.

3.4 Recapitulación

La utilización de técnicas difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental enriquece las metodologías convencionales (*crisp*) en varios aspectos:

- ✓ Permite definir de una manera más adecuada conceptos vagos tales como *Impacto leve* o *impacto moderado*.
- ✓ Permite representar la incertidumbre de las predicciones efectuadas en la evaluación.
- ✓ Brinda un único marco conceptual para el manejo simultáneo de variables lingüísticas y numéricas, es decir, para la combinación de información cualitativa y cuantitativa.
- ✓ Facilita la labor de equipos interdisciplinarios, ya que cada experto, o grupo de expertos, puede caracterizar los impactos según las propiedades que estime necesarias, sin que necesariamente sean las mismas empleadas por los otros expertos. Lo anterior se debe a que cada impacto se puede calcular con un sistema de computación con palabras diferente.
- ✓ Pueden manejarse simultáneamente variables definidas con distinta *granularidad*, de tal manera que los distintos impactos pueden estudiarse con diferente nivel de detalle.
- ✓ Permite caracterizar las medidas correctoras a tomar, gracias a la utilización del razonamiento inverso en los sistemas de computación con palabras.
- ✓ La metodología difusa abarca varias metodologías *crisp*.

