

## **La modelación ambiental de proyectos ambientales como instrumento de ayuda a la toma de decisiones**

### *The environmental modeling of environmental projects as an instrument to help decision-making*

**Darlines Yaima Sánchez Muñoz<sup>1</sup>**

#### **RESUMEN**

Se presenta en este artículo un modelo para determinar los valores de los impactos ambientales identificados en un proyecto minero a partir del valor del Efecto Ambiental Global deseado para este, con el propósito de conocer el comportamiento de los impactos y afectaciones ambientales. Para ello se deben escoger entre todas las posibles alternativas generadas la más adecuada y que corresponda a los criterios que los expertos tienen en cuenta para su selección. La toma de la decisión de cual alternativa seleccionar se realiza aplicando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) en su modificación difusa. Se toma como caso de estudio el Yacimiento de Punta Gorda, Moa.

**Palabras claves:** conjuntos difusos, método multicriterio, evaluación de impacto ambiental.

#### **ABSTRACT:**

This paper presents a model for determining the values of the environmental impacts identified in a mining project from the Global Environmental Impact value preferred for this, for understand the behavior of these environmental impacts and effects. For this is necessary choose between all possible alternatives which generated more appropriate and matches the criteria that experts have considered for selection. The decision making to select which alternative was made using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP). In the research was taken as a case study the Punta Gorda deposit, in Moa.

**Key words:** fuzzy sets, multicriteria method, environmental impact assessment.

Recibido 20 de septiembre del 2018; revisión aceptada 14 de octubre 2018

### **1. INTRODUCCIÓN**

El análisis multicriterio puede ser utilizado en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, sobre todo si además de permitir seleccionar la alternativa más factible para lograr un determinado objetivo [1], también es posible modelar la incertidumbre propia de los criterios y juicios emitidos por las personas encargadas de realizar la evaluación [2].

El objetivo principal de este trabajo es determinar los valores de los impactos ambientales conociendo el valor del Efecto Ambiental Global en un proyecto minero. Se tiene como base

---

<sup>1</sup> Universidade Agostinho Neto, Angola, [darlincu@gmail.com](mailto:darlincu@gmail.com)

para esto la jerarquía de Efecto Ambiental del proyecto, la cual en el último nivel tiene los impactos ambientales evaluados.

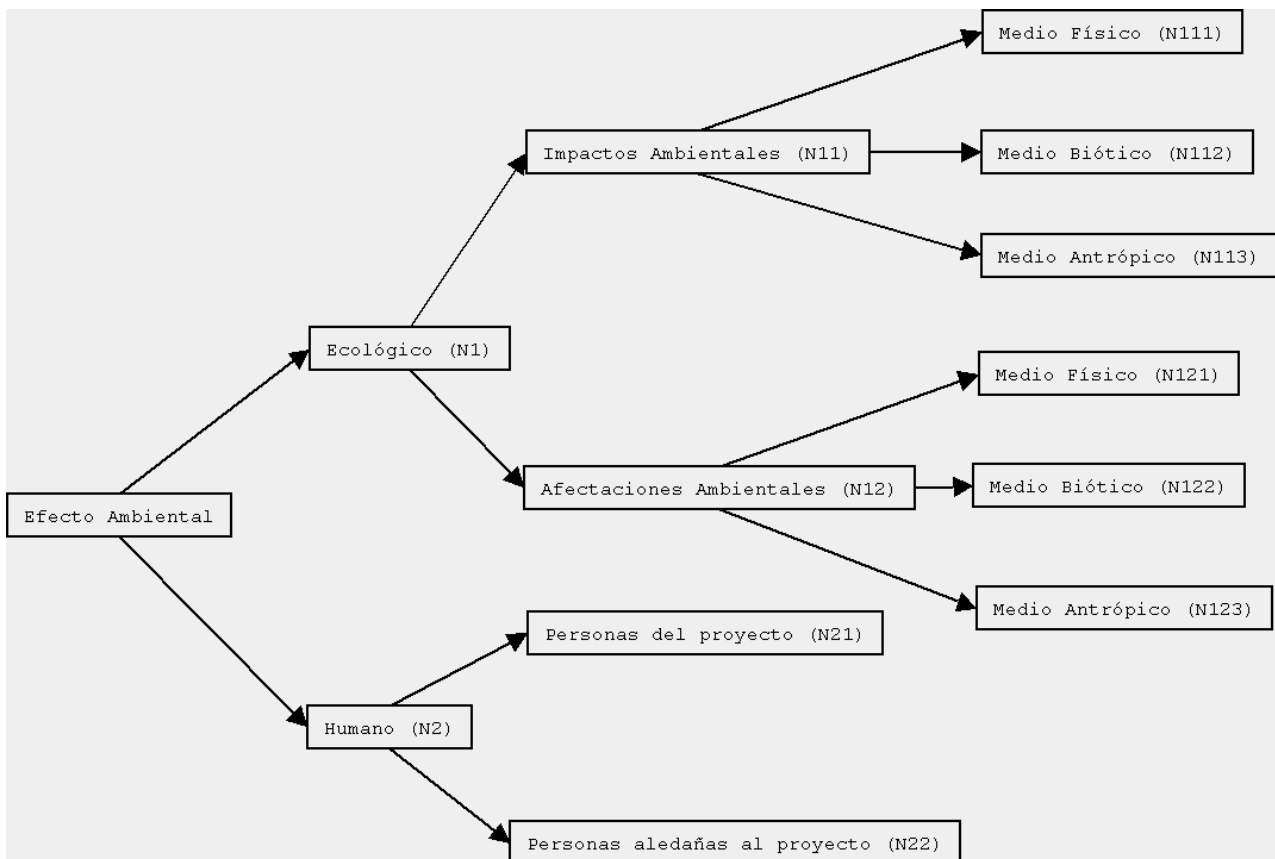
En el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental se han utilizado métodos multicriterios según se expone en [2] y [1] para encontrar la mejor alternativa de ejecución del proyecto evaluado, incluso con la incorporación de la teoría de conjuntos difusos. En este artículo se muestra una aplicación diferente, teniendo en cuenta que en ocasiones las autoridades encargadas de la aprobación de un proyecto minero desean conocer el comportamiento de las variables ambientales que intervienen en el proceso de evaluación y las afectaciones causadas, si se conoce que el valor global de la afectación del proyecto no puede exceder un determinado valor umbral. A partir de un conjunto de alternativas generadas teniendo en cuenta un valor predeterminado de Efecto Ambiental del proyecto, se debe de seleccionar cuales de estas son factibles según los criterios de los expertos encargados de la evaluación, determinándose este aspecto con la aplicación del método AHP en su modificación difusa [3]. Durante el proceso de selección son desechadas las alternativas que no cumplen con las expectativas del grupo de expertos seleccionados, así como las que son matemáticamente improbables.

En este trabajo se mostrará la estructura jerárquica a partir de la cual se realiza el proceso de toma de decisiones, así como la aplicación del método AHP Difuso mediante un ejemplo tomado del caso de estudio del Yacimiento Minero de Punta Gorda en Moa, Cuba.

## 2. METODOLOGÍA

El Efecto Ambiental Global de un proyecto minero se determina mediante una estructura por niveles desarrollada una vez que se hayan identificado y caracterizado los impactos e indicadores ambientales

La jerarquía cuenta con dos nodos fundamentales: Ecológicos ( $N_1$ ) y Humanos ( $N_2$ ). El nodo  $N_2$ , se divide en personas que intervienen en el proyecto y personas que viven en áreas aledañas al proyecto. En el caso de los ecológicos, se dividen además en afectaciones ambientales e impactos ambientales. Se hace una clasificación de los impactos ambientales seleccionados y su ubicación en cada una de las ramas de la jerarquía, igualmente para los impactos ambientales que afectan la salud humana. La estructura jerárquica cuenta con 4 niveles, los nodos del último nivel serán los impactos ambientales identificados y caracterizados en el proyecto (Figura 1).



**Figura 1:** Estructura Jerárquica para determinar el Efecto Ambiental Global del Proyecto

Teniendo como base la jerarquía de la Figura 1 se pueden determinar los valores de efectos parciales de los impactos y afectaciones ambientales conociendo el valor del efecto del proyecto.

### Diseño de Proyectos Ambientales

El diseño de proyectos ambientales consiste en que dado un valor de Efecto Ambiental Global deseado de un proyecto se obtienen los valores de efecto ambiental parcial de los impactos y afectaciones ambientales identificadas en etapas previas de evaluación del proyecto.

Partiendo de la estructura de la Figura 1 se hace un desglose de la misma conociendo a priori el valor del efecto ambiental del proyecto. Teniendo en cuenta que los valores en la jerarquía son etiquetas lingüísticas se realizan operaciones de agregación.

$$E_T = CB(E_i) \quad (1)$$

$$E_i = CB(E_{ij}) \quad (2)$$

$$E_{ij} = CB(E_{ijk}) \quad (3)$$

$$E_{ijk} = CB(E_{ijk_r}) \quad (4)$$

$$E_{ijk_r} = CB(I_{ijk_r} \times M_{ijk_r}) \quad (5)$$

$$I_{ijk_r} = CB(VI) \quad (6)$$

En (1) se obtiene la combinación de valores de efecto ambiental de los nodos principales de la jerarquía ( $E_i$ ) para determinar el valor de efecto del proyecto deseado. Se realiza el proceso de desagregación de los valores aplicando las ecuaciones de 2-6.

En el caso de VI (variables de la importancia), son los valores de las variables que intervienen en el cálculo de la importancia [7] (intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, acumulación, efecto, periodicidad, recuperabilidad, etc.). CB determina las combinaciones de los valores de estas variables, teniendo en cuenta el efecto ambiental deseado.

La magnitud de cada impacto sobre cada factor, según la acción que lo provoca, se determina según el criterio de los expertos teniendo en cuenta los valores de los indicadores ambientales.

Al obtener la combinación de valores de cada uno de los Medios del Entorno, refiriéndonos a la jerarquía de efecto ambiental (Figura 1), se determinan los diferentes resultados que pueden ser obtenidos por cada uno de los impactos que conforman el último nivel de la estructura, lo que veremos en la siguiente sesión que serán las alternativas.

Con los posibles resultados de efectos ambientales de cada impacto, se obtienen las combinaciones de valores de la importancia y de la magnitud.

Por cada valor de la Importancia del impacto fijado, se obtienen los posibles valores de cada una de las variables que intervienen en el cálculo de la misma.

$$VI = CB(IN, EX, MO, PE, RV, SI, AC, EF, PR, MC) \quad (7)$$

A partir de estos, el experto puede diseñar su proyecto imponiendo sobre él sus criterios, para obtener el valor de Efecto Ambiental deseado. Para esto se realizó un modelo apoyado en técnicas de ayuda a la toma de decisiones utilizando el AHP Difuso [3].

### **Aplicación del Método AHP Difuso al diseño de Proyectos Ambientales**

Siguiendo cada una de las etapas del AHP para el diseño de proyectos ambientales podemos determinar la mejor alternativa de valores de impactos ambientales, que nos permite obtener un determinado valor de efecto ambiental. A continuación, mostramos cada una de esas etapas.

#### **I. Identificación del problema.**

Con la aplicación del método multicriterio se realizó la selección y la priorización entre las combinaciones de los valores de impactos ambientales obtenidos según el efecto ambiental global deseado, como parte del diseño de proyectos ambientales. Teniendo en cuenta los criterios determinados por los expertos, según se plantea en [8].

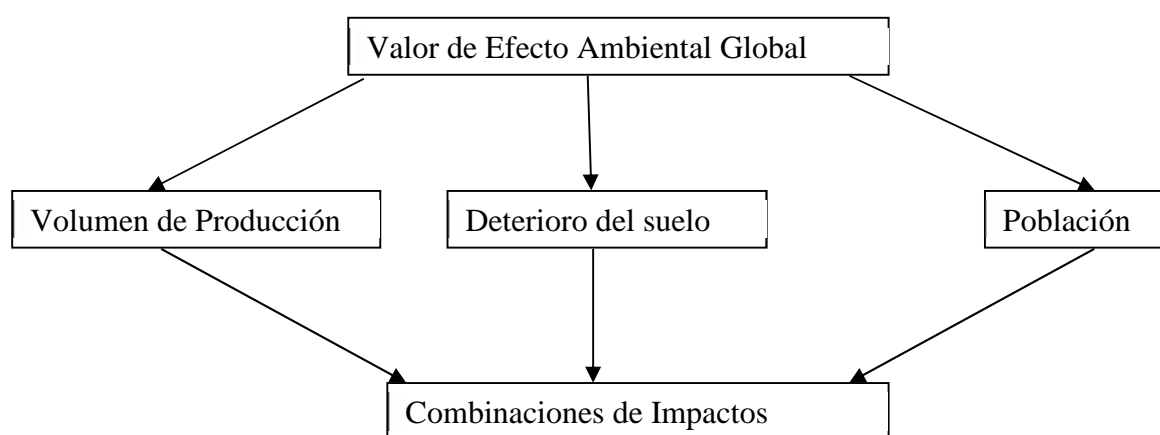
## II. Identificación de los criterios.

La zona industrial de Moa, es uno de los pilares de la economía de Cuba, su nivel de producción es fundamental para el territorio y para el país, mayor aún en momentos en que el precio del mineral que aquí se extrae asciende en el mercado internacional.

Los recursos minerales son una fuente agotable, por lo que se pretende, una vez terminada la explotación minera en las áreas, lograr un paisaje que se asemeje lo más posible a las características anteriores al inicio de la explotación minera, intentando lograr con el discursar de los años una mejor calidad del paisaje [9]. La principal víctima, por así llamarle, y el factor afectado de forma más directa es el suelo, y es muy difícil devolverle sus propiedades una vez llegada la etapa de la rehabilitación minera, por esto es un criterio a tener en cuenta si se desean conocer los valores de las variables ambientales que intervienen en la evaluación.

Indirectamente, sufren efectos por causa de la actividad minera, las personas que participan en el proyecto que se pone en marcha, así como las que forman los grupos poblacionales aledaños a las áreas del proyecto. Este ha sido un elemento que los expertos no han pasado por alto, por lo que ha sido seleccionado por ellos como uno de los criterios a tener en cuenta.

La estructura jerárquica desarrollada queda como se muestra en la Figura 2:



**Figura 2:** Estructura Jerárquica de la aplicación Método AHP

### III. Descripción detallada de los criterios de la Jerarquía.

En el primer nivel de la jerarquía se ubica el propósito de la aplicación de la metodología, es decir, encontrar el conjunto de alternativas que permitan obtener el valor de efecto ambiental que se desea, a partir de la combinación de valores de las variables que intervienen en el proceso de evaluación de impacto.

El segundo nivel corresponde a los criterios a tener en cuenta para seleccionar el mejor conjunto de alternativas, seleccionados a partir del consenso de los expertos.

En el último nivel de la estructura jerárquica se ubican las alternativas, que la van a conformar las combinaciones de valores generados a partir del valor de efecto ambiental deseado.

En la Tabla 1 se muestran cada uno de los criterios y su descripción según fue concebido por los expertos.

**Tabla 1:** Descripción de los criterios de los expertos.

<b>Criterios</b>	<b>Descripción</b>
Volumen de Producción	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que conllevan a un aumento de la producción teniendo en cuenta el plan anual de producción.
Deterioro del Suelo	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que contribuyen al aumento de la calidad del suelo.
Población	Asigna una distinción a las combinaciones de valores de impactos que contribuyen a la disminución del número de personas afectadas por el proyecto.

#### Descripción detallada de la estructura jerárquica

- **Volumen de Producción:** Con este criterio los expertos tienen en cuenta los aspectos relacionados con el aumento de la producción minera, vinculados al factor económico, dependiendo de los precios en que se encuentre el producto exportable (Níquel) en el mercado internacional. Otros factores a tener en cuenta son el aumento de la extensión del área en explotación, el aumento de las labores mineras, el mayor número de personal contratado para el proyecto y el aumento del número de transportes de mineral a utilizar.
- **Deterioro del suelo:** Los expertos de la zona basan este criterio en factores como la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, productividad y fertilidad del mismo, destrucción de la red de drenaje original y la deposición de polvo en las aguas [10].
- **Población:** Con este criterio se tiene en cuenta la afectación tanto del personal que labora

en el proyecto, como la población aledaña a la zona de este. En el caso de los trabajadores del mismo se tiene en cuenta fundamentalmente el cumplimiento de la ley de Protección e Higiene del Trabajo, afectaciones de salud de ambos grupos poblacionales y nivel de empleo e inmigración a la zona por causa del proyecto.

### Identificación de las alternativas.

Las alternativas son las combinaciones de los valores de impactos ambientales que tributan al valor de efecto ambiental global deseado, teniendo en cuenta los criterios seleccionados que establecen prioridades entre las alternativas a ser elegidas.

Para obtener estas alternativas, inicialmente se toma el valor de efecto ambiental que se desea, y los pesos de cada uno de los nodos de la jerarquía según la opinión de los expertos. Este valor es defusificado ( $E_T$ ) como lo muestran los autores en [11] y [12] y se generan todos los valores que cumplen las inecuaciones de 8-11:

$$E_T \geq \frac{\sum E_i}{2} \quad (8)$$

$$E_i \geq \frac{P_{i,1}E_{i,1} + P_{i,2}E_{i,2} + \dots + P_{i,r}E_{i,r}}{P_{i,1} + P_{i,2} + \dots + P_{i,r}} \quad (9)$$

$$E_{i,j} \geq \frac{P_{i,j,1}E_{i,j,1} + P_{i,j,2}E_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}E_{i,j,r}}{P_{i,j,1} + P_{i,j,2} + \dots + P_{i,j,r}} \quad (10)$$

$$E_{i,j,k} \geq \frac{P_{i,j,k,1}E_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2}E_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}E_{i,j,k,r}}{P_{i,j,k,1} + P_{i,j,k,2} + \dots + P_{i,j,k,r}} \quad (11)$$

Una vez obtenidos estos valores, se realiza un proceso de fusificación de estos resultados, obteniéndose finalmente las alternativas, que son el conjunto de valores de efecto ambiental de cada impacto para el valor de  $E_T$  deseado.

Supongamos que el problema de toma de decisiones consiste en encontrar la mejor alternativa para lograr un valor de efecto ambiental global Moderado. Los criterios a tener en cuenta son los representados en la estructura jerárquica, Figura 2: volumen de producción, deterioro del suelo y población. Se generan un conjunto de más de 10 alternativas, para mayor claridad del ejemplo tomaremos solo 3, como se muestra en la Tabla 2.

El objetivo es encontrar la alternativa que se satisfaga teniendo en cuenta los criterios. Se encuentra la solución haciendo uso del método AHP Difuso.

Se construye la estructura jerárquica de la Figura 2, se buscan los pesos de los criterios que se derivan de la matriz de comparación por pares. En este ejemplo tenemos en cuenta que los juicios de comparación de los expertos son representados como números difusos triangulares  $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$  tal que  $l_{ij} > m_{ij} > u_{ij}$ .

### 3. RESULTADOS

Los juicios emitidos por los expertos representados como número difusos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Combinaciones encontradas a partir del efecto deseado (alternativas)

No	Impactos	Valor Impacto
Alternativa 1	Alteración del relieve natural Incremento de la intensidad de los procesos erosivos. Pérdida de materia orgánica Compactación crítica de los suelos Sólidos en suspensión Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería. Contaminación sónica.	Moderado Moderado Aceptable Aceptable Aceptable Aceptable Aceptable
Alternativa 2	Alteración del relieve natural Incremento de la intensidad de los procesos erosivos. Pérdida de materia orgánica Compactación crítica de los suelos Sólidos en suspensión Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería. Contaminación sónica.	Aceptable Aceptable Aceptable Moderado Aceptable Moderado Aceptable
Alternativa 3	Alteración del relieve natural Incremento de la intensidad de los procesos erosivos. Pérdida de materia orgánica Compactación crítica de los suelos Sólidos en suspensión Aumento de la insolación y la temperatura producto a las labores de minería. Contaminación sónica.	Moderado Aceptable Aceptable Aceptable Moderado Aceptable Aceptable

Aplicando el método AHP donde se realiza la comparación de criterios por pares, en este caso teniendo en cuenta juicios difusos, se obtiene:



**Tabla 3:** Criterios de comparación de los expertos por pares para cada criterio

<b>Objetivo</b>	<b>Volumen de Producción</b>	<b>Deterioro del Suelo</b>	<b>Población</b>
<b>Volumen de Producción</b>	1	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)
<b>Deterioro del Suelo</b>	(1/4, 1/3, 1/2)	1	(1/3, 1/2, 1)
<b>Población</b>	(1/3, 1/2, 1)	(1, 2, 3)	1

De la Tabla 3 obtenemos que el volumen de producción sea el criterio más importante. El cual es alrededor de 3 veces más importante que el deterioro del suelo, y alrededor de 2 veces más importante que la población. La población es alrededor de 2 veces más importante que el deterioro del suelo.

Los pesos obtenidos para el criterio principal son:

$v_1 = 0.538$  (Volumen de producción)

$v_2 = 0.170$  (Deterioro del suelo)

$v_3 = 0.292$  (Población)

Las proporciones de los pesos obtenidos son  $\frac{v_1}{v_2} = 3.162$ ,  $\frac{v_1}{v_3} = 1.838$ ,  $\frac{v_2}{v_3} = 0.581$ , por lo que

los juicios difusos inicialmente emitidos son aproximadamente satisfechos. Por ejemplo, la proporción entre la comparación entre el Volumen de producción y Deterioro del suelo como

se muestra en la Tabla 3 es alrededor de 3, correspondiendo con el valor de  $\frac{v_1}{v_2} = 3.162$ . Otra

forma de obtener las proporciones de los juicios de comparación es que  $\mu_{12} = \mu_{13} = \mu_{23} = 0.838$ , por lo que los juicios inicialmente emitidos son satisfechos con la solución.

El valor positivo del índice de consistencia indica que los juicios difusos son relativamente consistentes.

Haciendo una comparación por parejas en el próximo nivel de la jerarquía, tendríamos las siguientes tablas:

**Tabla 4:** Comparación de alternativas desde el punto de vista del Volumen de Producción.

Volumen de Producción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)
Alternativa 2	(1/4, 1/3, 1/2)	1	(4, 5, 6)
Alternativa 3	(1/8, 1/7, 1/6)	(1/6, 1/5, 1/4)	1

**Tabla 5:** Comparación de alternativas desde el punto de vista del Deterioro del suelo.

Deterioro del suelo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(1/3, 1/2, 1)	(1/5, 1/4, 1/3)
Alternativa 2	(1, 2, 3)	1	(1/3, 1/2, 1)
Alternativa 3	(3, 4, 5)	(1, 2, 3)	1

**Tabla 6:** Comparación de alternativas desde el punto de vista del Población.

Población	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/7, 1/6, 1/5)
Alternativa 2	(3, 4, 5)	1	(1/6, 1/5, 1/4)
Alternativa 3	(5, 6, 7)	(4, 5, 6)	1

Los valores numéricos mostrados en las tablas anteriores corresponden a los pesos de las alternativas por cada uno de los criterios seleccionados para las comparaciones por pares por los expertos. Los resultados son mostrados en la Tabla 7:

**Tabla 7:** Resumen de los valores de las alternativas por cada criterio.

	<b>Pesos de los criterios</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
<b>Volumen de Producción</b>	0.538	0.615	0.308	0.077
<b>Deterioro del suelo</b>	0.170	0.143	0.286	0.571
<b>Población</b>	0.292	0.085	0.209	0.706

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 7, continuamos con la aplicación del método AHP difuso, donde se suma por cada alternativa, la multiplicación del peso de estas por el peso del criterio principal, las fórmulas que realizan estos cálculos son:

$$\text{Alternativa 1: } 0.538 * 0.615 + 0.170 * 0.143 + 0.292 * 0.085 = 0.37 \quad (12)$$

$$\text{Alternativa 2: } 0.538 * 0.308 + 0.170 * 0.286 + 0.292 * 0.209 = 0.26 \quad (13)$$

$$\text{Alternativa 3: } 0.538 * 0.077 + 0.170 * 0.571 + 0.292 * 0.706 = 0.33 \quad (14)$$

A partir de aquí podemos concluir que, de las tres alternativas a seleccionar para lograr nuestro objetivo, un valor de efecto ambiental global moderado, teniendo en cuenta los criterios emitidos por los expertos, obtenemos que la mejor alternativa es la Alternativa 1. Aplicando el método AHP difuso se obtiene además de la alternativa más adecuada para afectar el medio en la menor medida posible, teniendo en cuenta determinados criterios y el valor global deseado, un orden de importancia en el resto de las alternativas.

#### 4. CONCLUSIONES

Cuando se emprende la realización de una actividad, en nuestro caso de minería, se necesita conocer en la mayor brevedad toda consecuencia ambiental en el ciclo del proyecto y tenerla en cuenta para el diseño del mismo. Además, de forma temprana se necesita conocer si sería necesario imponer limitaciones al proyecto, teniendo en cuenta que las autoridades legales exigen determinadas características del mismo en cuanto a lo que a afectación del medio se refiere. Como se ha presentado, al realizar el diseño desde el punto de vista medioambiental de

proyectos mediante el método AHP, se definen las personas que serán los encargados de realizar las evaluaciones de las alternativas, los criterios que estas tendrán para seleccionar la mejor alternativa, así como las alternativas posibles. Se desarrolla una estructura jerárquica del problema de toma de decisiones. Las alternativas se generan a partir de los criterios de los expertos y el valor de efecto ambiental global deseado.

Este modelo le permite a las personas encargadas de realizar la Evaluación de Impacto Ambiental en un proyecto minero y de la aprobación o no del mismo, conocer de antemano cual es el límite de valores que puede tener las valoraciones de cada uno de los impactos y afectaciones ambientales identificados, o lo que es lo mismo, que circunstancias no pueden darse en el proyecto si se desea mantener un Efecto Ambiental Global dentro de los límites permisibles. Esto favorece el desempeño futuro de los ejecutores del proyecto que conocen que deben o no hacer para no excederse de los rangos concebidos inicialmente.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. Ramos Monteiro, “Modelos Multicriterios Difusos. Aplicaciones.” Universidad de Granada, 2003, 2003.
- [2] L. Garcia Leyton, “Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales,” Universidad Politecnica de Cataluña, Cataluña, 2004.
- [3] J. J. Buckley, “Fuzzy Hierarchical Analysis,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 17, pp. 233-247, 1985.
- [4] R. Sadiq e T. Husain, “A fuzzy-based methodology for an aggregative environmental risk assessment: a case study drilling waste.”, *Environmental Modelling and Software*, vol. 20, pp. 33-46, 2005.
- [5] G. Espinosa, Gestión y Fundamentos de Evaluación de impacto Ambiental., Santiago de Chile: Centro de Estudios para el Desarrollo, 2002.
- [6] M. Delgado Flores, A. Vila e J. L. Verdegay, “On aggregation operations of linguistic labels.”, *International Journal of intelligent System*, vol. 8, nº Mundi Prensa, pp. 351-370, 1993.
- [7] V. Conesa Fernández, Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid: Mundi Prensa, 1997.
- [8] T. Saaty, The Analytic Process, New York: Mc Graw Hill Book Co., 1980.
- [9] CEPRONIQUEL, “Estudio de Línea Base del Yacimiento de Punta Gorda,” Departamento Técnico Subdirección de Minas Emp. Che Guevara, Moa, 1998.
- [10] T. Hernández, “Evaluación de Impacto Ambiental en el Yacimiento de Punta Gorda.”, Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa, Moa, 2003.
- [11] A. Patel e B. Mohan, “Some numerical aspects of center of area defuzzification method.”, *Fuzzy sets and systems*, vol. 132, pp. 401-409, 2003.

- [12] R. Zhao e R. Goving, “Defuzzification of fuzzy intervals,” *Fuzzy sets and systems*, vol. 43, pp. 45-55, 1991.
- [13] A. Almendia Salvador, A. Salvador Alcaide, C. Crespo Sánchez e L. Garmendia Salvador, *Evaluación de Impacto Ambiental*, PEARSON PRENTICE HALL, 2005.