

# CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE INFRAESTRUCTURAS LINEALES

(ENVIRONMENTAL CRITERIA FOR THE SELECTION OF A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM IN THE ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF LINEAR INFRASTRUCTURES)

Casermeyro, M. A.; Pantojo, I.; Moreno, S. y Mayo, M.

Fecha de recepción: 28-VI-00

ESPAÑA

113-53

## RESUMEN

*Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta muy poderosa para la evaluación de los impactos ambientales de grandes infraestructuras lineales. El proceso de evaluación comienza con el análisis de la actividad y de los factores físicos y ecológicos del medio. En la mayoría de los métodos, la selección de los criterios ambientales usados para la discriminación de alternativas se convierte en el cuello de botella del proceso de evaluación. En este artículo se presenta una metodología de trabajo en la que se proponen varios criterios medioambientales para la selección de alternativas de trazado de infraestructuras lineales. El uso de esta metodología multinivel puede ayudar a los profesionales involucrados en la planificación del medio físico en la toma de decisiones para la selección de la mejor alternativa de trazado de infraestructuras lineales.*

## SUMMARY

*Geographic Information Systems can be considered as one of the most powerful tools for the Environmental Impact Assessment in the long distance railways and highways infrastructures. The evaluation process begins with the analysis of the activity and the physical and ecological geography. One of the most common bottlenecks is the use of environmental criteria for the discrimination of different evaluation proposals. A methodological approach is presented with seven diverse environmental criteria involved. The use of this multilevel methodology can help to physical planners and decision makers in the selection of the best environmental proposal.*

## 1. Introducción

Una infraestructura lineal de grandes dimensiones (carretera, vía de ferrocarril, tendidos eléctricos, sistemas de conducción, etc.), debido a sus particularidades, afecta al medio de manera distinta a como podría hacerlo una instalación puntual, cuyas repercusiones ambientales, en la mayoría de los casos, son de índole local.

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que determine la traza de la obra civil de manera que se maximice la capacidad del territorio para

acogerla y, al mismo tiempo, se minimice el impacto negativo sobre el medio ambiente (1).

Para poder establecer con rigor los impactos potenciales que la construcción de una infraestructura lineal causa en el entorno natural, se debe tener información del medio físico del territorio por el que discurren las distintas alternativas de trazado.

Se establece el concepto de **unidad ambiental** como base para la valoración del territorio. Dicha unidad pretende agregar toda la información asociada a una parcela del

territorio considerada homogénea desde el punto de vista ambiental. Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta potente que permite manejar un gran volumen de información gráfica y alfanumérica (2). Así, permite integrar todo el volumen de información generado para la definición de las unidades ambientales del territorio y cruzarlo con la traza de cada una de las alternativas estudiadas.

En el caso de una gran infraestructura lineal la zona afectada tiene una gran superficie, por lo que el volumen de información será muy grande. Aun así, los ordenadores personales actuales, en combinación con los SIG de sobremesa (Desktop GIS) presentan una capacidad de proceso de la información suficiente, al menos a las escalas utilizadas a nivel de anteproyecto (1:200.000, 1:100.000 y hasta 1:50.000). Así, se podría aseverar que el hardware y el software ya no representan ningún problema en un proyecto SIG.

Otra cuestión son los datos, los mapas. Nunca hay que olvidar que un SIG sólo es tan bueno como la información que contiene. Para poder realizar un análisis de impacto se hace necesario disponer de cierta cartografía de partida. Así, son de gran utilidad:

- . Mapa topográfico que incluya vías de comunicación, hidrografía, núcleos urbanos, curvas de nivel, etc...
- . Mapa de vegetación, vegetación protegida
- . Mapa de biotopos de fauna, fauna protegida
- . Mapa de lugares protegidos: parques nacionales, naturales, regionales, zepas,... o sus agrupaciones, red Natura 2000, Lugares de Interés Comunitario...
- . Mapa geológico o, mejor, de Puntos de Interés Geológico
- . Mapa edafológico

En un primer análisis, los SIG permiten crear mapas de gran utilidad derivados de los anteriores:

- . Modelo Digital del Terreno, MDT (mapa de altitudes), a partir de las curvas de nivel y puntos acotados.
- . Mapas de pendientes y orientaciones, derivados del anterior.
- . Mapa de paisaje, combinando distintas cartografías dependiendo del modelo de paisaje empleado.
- . Mapas de cuencas visuales, basado en el MDT.

Cada una de las unidades ambientales definidas se valoran según una serie de criterios jerarquizados y técnicas de ordenación vectorial (3), transformando de esta manera la unidades ambientales en unidades de calidad ambiental.

Antes de definir los impactos ambientales que una actuación causa sobre el medio, es necesario definir los siguientes conceptos:

**-Calidad ambiental:** méritos o cualidades para la conservación que tiene un territorio.

**-Fragilidad ambiental:** propiedad de un territorio o sistema natural para soportar las perturbaciones.

El uso de la palabra impacto ha dado lugar a no poca controversia, aunque algunos autores, como Margalef (4), consideran su uso adecuado porque *sugiere el carácter discontinuo, brusco y asimétrico que tiene en general la perturbación en relación con el cambio sucesional que se produce en un ecosistema*. Sin embargo, no en todas las ocasiones la perturbación presenta esas cualidades, dificultando la predicción y evaluación de los impactos. Otra opinión, aceptada de forma general por la sociedad, es que el impacto siempre es negativo, juicio que debe ser demostrado tal como se explica en el anexo I del RD 1131/88, puesto que no necesariamente ha de serlo

Se puede definir impacto ambiental como la modificación de calidad ambiental de un territorio por la implantación en él de una actividad. Ante una misma actuación y con la misma fragilidad, se produce mayor impacto en aquel territorio con mayor calidad. De forma análoga cuanto más frágil es el territorio, mayor sensibilidad a la perturbación. En ocasiones, ante igualdad de calidad ambiental y de actuación la única forma de discriminar el nivel de impacto es mediante el concepto de fragilidad.

Para la valoración del territorio se propone un proceso de agregación hasta la definición de una serie de **unidades ambientales**, de este modo es muy cómodo trabajar con un gran volumen de información primaria de forma cómoda y automatizada. El resultado de esta agregación de información ambiental es una cartografía temática nueva, que permitirá más adelante la evaluación de los impactos ambientales. Al mismo tiempo, se establecen criterios de valoración en la fase de campo con el objeto de facilitar la agregación de las nuevas unidades y favorecer su análisis. La metodología de trabajo queda reflejada en la Figura 1.

## 2. Metodología

La metodología propuesta para la evaluación de impacto ambiental de una gran infraestructura lineal puede resumirse en los siguientes pasos:

- . Recopilación previa de información:

Aquí se tendrá en cuenta toda la información existente sobre el territorio afectado por las distintas alternativas de la traza de la infraestructura. Son de mucha utilidad los mapas digitales de vegetación a escala 1:50.000 realizados por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza; mapas topográficos digitalizados a escala 1:200.000, las bases de datos que recogen la cartografía digital de las zonas que cumplen los criterios establecidos

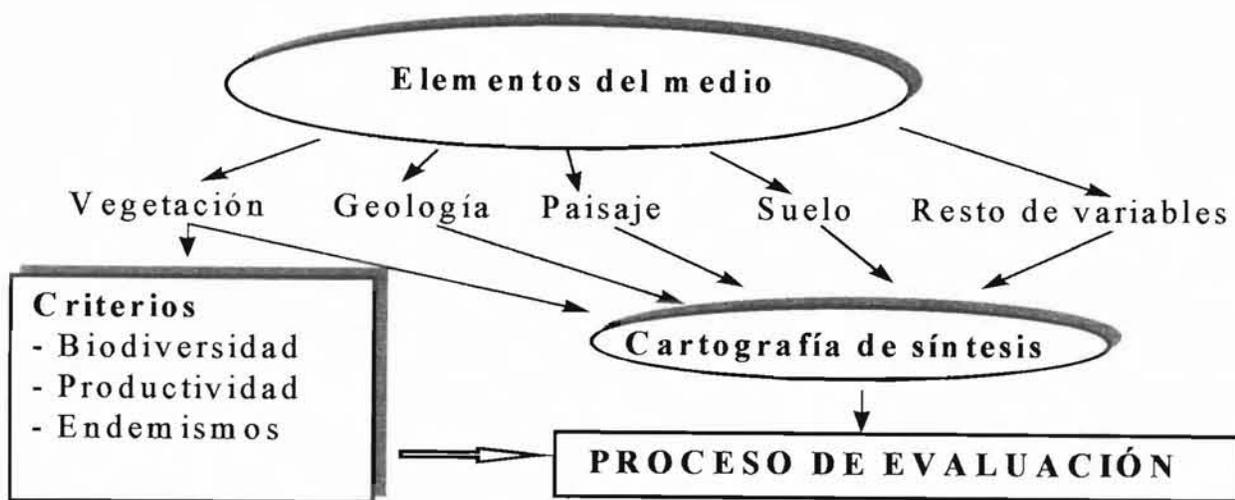


Figura 1.- Esquema de trabajo.

en la Directiva 92/43/CEE, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestre; cartografía de los puntos de interés geológico del territorio; mapas de series de vegetación; mapas catastrales, y cuanta información sea precisa para definir las unidades ambientales que componen el territorio en estudio.

. Trabajo previo de gabinete:

La información anterior se introduce en un sistema de información geográfica, SIG, y se homogeneizan las escalas a una adecuada a las dimensiones de las trazas estudiadas. Para la selección de alternativas a escala suprarregional, se considera que la escala 1:200.000 proporciona un nivel de detalle adecuado y una cantidad de información manejable. La información no disponible en base digital, se digitaliza para poder tratarla en el SIG y, sobre la cartografía digital generada, se trazan las distintas alternativas consideradas para la infraestructura lineal. Dicha cartografía integra toda la información recopilada en la fase anterior, originando un mapa como el de la Figura 1 en el que se han definido nuevas unidades, basadas principalmente en la vegetación dominante.

. Trabajo de campo:

Usando la cartografía definida en el punto anterior y unificando los criterios de evaluación del medio mediante las fichas de campo. Se recorren todas las posibles alternativas de trazado de la infraestructura lineal. Se comprueba en campo la veracidad de la información generada en gabinete y se realiza una primera valoración del medio.

Los aspectos principales contemplados en las fichas de campo son los siguientes:

-FISONOMÍA DE LA VEGETACIÓN: Bosque cerrado. Bosque abierto. Matorral alto (biotipo dominante nanofanerofitos). Matorral bajo (*camefitos*). Herbazales. Otros tipos.

-RIQUEZA EN ESPECIES DE LA VEGETACIÓN: ALTA (pluriespecífico del estrato dominante), MEDIA, BAJA (monoespecífico).

-CUENCAS VISUALES: superficie geográfica que se ve desde un punto. En este caso se consideran las cuencas visuales internas, es decir desde la traza hacia las unidades adyacentes. ALTA: acceso visual a las unidades adyacentes. MEDIA: acceso visual limitado sobre las unidades adyacentes, existe un eje visual prioritario. BAJA: acceso visual muy limitado.

-NATURALIDAD DEL PAISAJE: Carreteras: autovías, nacionales o comarcales. Población: ciudad, pueblo. Cultivo: herbáceos, leñoso, arbolados o no. Otros (especificar): ferrocarriles. Líneas de alta tensión, conducciones, viaductos, túneles,...

-TIPO DE RELIEVE: según nomenclatura de la FAO (5).

-FAUNA: biotopo: zonas de alimentación o refugio. Endemismos (potencialidad). Otros (especificar).

Trabajo final de gabinete:

Con la cartografía elaborada en la fase de gabinete anterior, la información generada en la fase de trabajo en campo y el uso de otra cartografía, se definen las UNIDADES AMBIENTALES atravesadas por los distintos trazados, a partir de las cuales se realiza la valoración final del medio y la evaluación de los impactos ambientales

En los apartados siguientes de este artículo se proponen los métodos de análisis del mapa de unidades ambientales que originarán los siguientes mapas:

- Mapa de cuencas visuales
- Mapa hipsométrico
- Mapa de calidad ambiental
- Mapa de impacto visual

A continuación, utilizando la potencia de análisis de los SIG, se implementa el modelo para el cálculo del impacto de cada una de las alternativas de la infraestructura. Esto es posible porque los SIG son capaces de superponer mapas y, como sistemas de información, se pueden realizar en la base de datos las consultas requeridas por la metodología de análisis expuesta en este artículo.

Finalmente, usando el módulo de edición de cartografía del Sistema de Información Geográfica se obtienen las salidas en papel de los mapas temáticos (Figura 2).

### 2.1. Criterios ambientales para su integración en el SIG

A continuación se proponen una serie de criterios que pueden ser utilizados para la valoración ambiental de los trazados de infraestructuras lineales:

#### 2.1.1. Paso por unidades singulares

Con la aplicación de este criterio se pretende determinar cuál de las alternativas consideradas afecta a una mayor superficie de unidades que han sido catalogadas como singulares en el estudio del medio. El criterio de ordenación de alternativas será: a mayor superficie de unidades singulares interceptadas mayor impacto ambiental y, por lo tanto, será preferible aquella alternativa que intercepte menor superficie de este tipo de unidades.

Lo habitual es que cada alternativa objeto de análisis posea distinta longitud, para establecer una comparación rigurosa entre ellas, es aconsejable normalizarla, es decir, referirlas todas a una misma longitud arbitraria tomada como referencia.

#### 2.1.2. Paso de la traza por zonas protegidas

La existencia de una figura de protección territorial o de las especies que en él viven, tiene un doble valor. Por un lado, es el reconocimiento de que ese área tiene un elevado valor ambiental y, por otro lado, obliga a la protección del territorio amparado por esa normativa, que, incluso, puede establecer de forma expresa la imposibilidad de ejecutar en él la infraestructura.

De lo anterior se deduce que el cruce a través de una zona amparada por la legislación es una dificultad de primer orden para el trazado de la infraestructura, porque, debido

a ese alto valor ambiental que otorga al territorio y los problemas de tipo legal que se derivan de ella, obligan a inferir un impacto elevado al paso de la traza por este tipo de zonas.

Así pues, a mayor superficie de zonas amparadas por normativa de tipo legal afectada, mayor impacto ambiental, por lo que será preferible a las demás aquella alternativa que intersecte menos superficie de este tipo.

#### 2.1.3. Paso por unidades de alta calidad ambiental

La incidencia de una infraestructura lineal está directamente relacionada con la calidad ambiental del territorio que atraviesa, de tal forma que a mayor calidad ambiental de aquél mayor será el impacto ambiental producido; de igual forma, para una misma calidad del territorio, a mayor superficie afectada mayor impacto ambiental.

Así pues, se considerará como preferible aquella alternativa que menos afecte a territorio calificado como de alta calidad ambiental (Tabla 1). Cada alternativa se valora según la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^5 Q_{k,i} \cdot p_k}{\sum_{k=1}^5 Q_{k,i}} \quad [1]$$

Donde:

$V_i$ , es el valor que se obtiene para la alternativa  $i$  aplicando el criterio de paso por unidades de calidad.

$Q_{k,i}$ , es el porcentaje normalizado de metros lineales para la alternativa  $i$  y la categoría  $k$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$  ó  $5$ .

$p_k$ , es el valor de ponderación dado a la categoría  $k$ .

TABLA 1

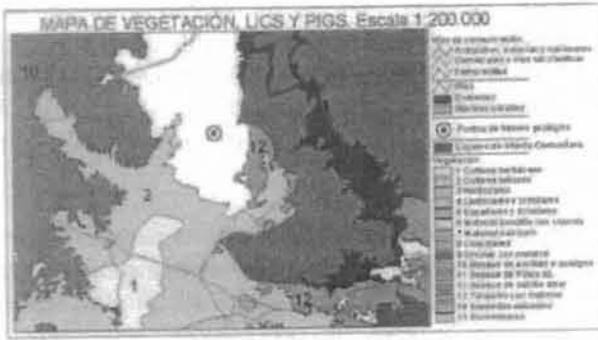
Coefficientes de ponderación de las categorías de calidad ambiental

Categoría de calidad ambiental	k	P
Muy Alta	1	5
Alta	2	4
Media	3	3
Baja	4	2
Muy baja	5	1

#### 2.1.4. Incidencia visual de cada alternativa

Uno de los impactos ambientales que presentan mayor relevancia en las infraestructuras lineales son los producidos sobre el paisaje, debido a la fuerte modificación de formas, volúmenes y colores a que dan lugar, así como a la intrusión que significa la mera inclusión de un elemento artificial en el entorno natural.

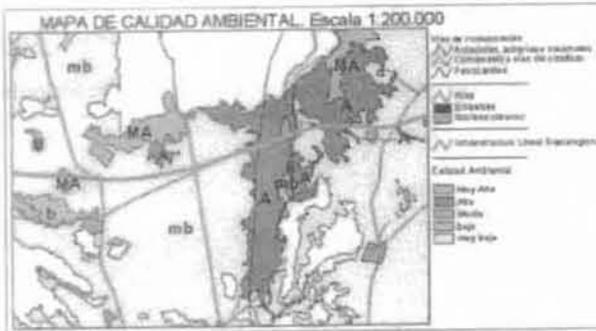
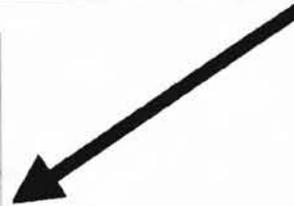
Al igual que para criterios anteriores, a igualdad de superficie afectada, se produce un mayor impacto sobre



1. Cartografía elaborada en gabinete a partir de la información preexistente



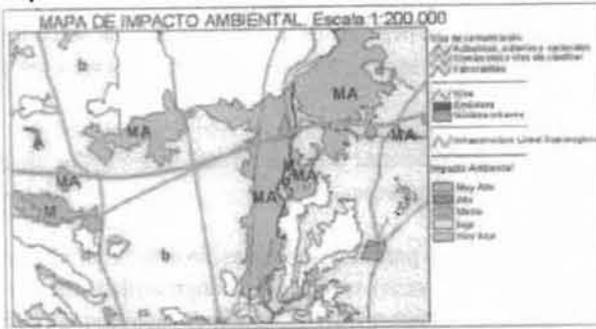
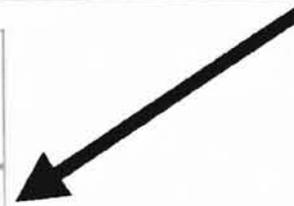
2. Cartografía de integración de las características del territorio.



3. Asignación de calidades al territorio



4. Elaboración a partir de un modelo digital del terreno de las cuencas visuales asociadas a la traza de cada alternativa.



5. Asignación de impactos ambientales a cada trazado sobre el territorio.

Figura 2.- Proceso de elaboración de la cartografía ambiental.

el paisaje cuanto mayor es la calidad de los paisajes afectados, mientras que, a igualdad de calidad del paisaje, el impacto es mayor cuanto más superficie se ve afectada.

La superficie afectada se evalúa mediante el cálculo de la cuenca visual, de cada una de las alternativas, que incluye unidades de alta o muy alta calidad.

Para el cálculo mediante el SIG de la cuenca visual se propone una visual máxima de 5 km a cada flanco de la infraestructura y una altura variable según la naturaleza de la infraestructura.

Cuando el trazado atraviere zonas con vegetación arbórea, se ha considerado que la cuenca visual está limitada a la propia traza, por lo que, a efectos de cálculo, se le asignará valor cero. Con objeto de facilitar los cálculos, sólo se tendrán en cuenta las superficies de muy alta y alta calidad ambiental interceptadas por las visuales (Tabla 2).

Cada alternativa se valora según la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^2 P_{k,i} \cdot P_k}{\sum_{k=1}^2 P_{k,j}} \quad [2]$$

Donde:

$V_i$ , es el valor que se obtiene para la alternativa  $i$  aplicando el criterio de incidencia visual.

$P_{k,i}$ , es el porcentaje normalizado de superficie para la alternativa  $i$  y la categoría  $k$ ,  $k = 1$  ó  $2$ .

$P_k$  es el valor de ponderación dado al intervalo de pendientes  $k$ .

TABLA 2

Coefficientes de ponderación de cada categoría de calidad

Categoría de calidad ambiental	k	Coefficiente de ponderación, p
Muy Alta	1	10
Alta	2	5

#### 2.1.5. Paso por zonas de fuertes pendientes

Una de las exigencias técnicas de la mayoría de las infraestructuras lineales, es que en su traza no existan pendientes por encima de un cierto valor dependiendo de la naturaleza de la infraestructura. Esto implica, para la ejecución de una obra de esas características, grandes movimientos de tierras y la construcción de viaductos para salvar las zonas del terreno con grandes depresiones. Estos movimientos de tierra están directamente relacionados con el paso por unidades territoriales con altas pendientes (6) (7) (8) (9).

Así pues, un criterio válido para evaluar el impacto ambiental potencial que cada alternativa de trazado causaría sobre el

medio, es el de comparar las distintas pendientes de los tramos que constituyen cada una de ellas. A partir del modelo digital de elevación del terreno basado en la cartografía digital 1:200.000, se genera un número suficiente de cotas para definir el perfil de cada una de las alternativas de la infraestructura.

La exigencia en la limitación de la pendiente máxima exigida por cada tipo de infraestructura es variable, pero como norma general se puede admitir los siguientes intervalos de pendientes para establecer prioridades entre los distintos trazados de una misma obra lineal (Tabla 3).

TABLA 3

Coefficiente de ponderación de cada intervalo de pendientes

Intervalo de pendientes (%)	k	Coefficiente de ponderación, p
0,00-0,05	1	0
0,05-0,5	2	0
0,50-1,00	3	0
1,00-5,00	4	3
5,00-10,00	5	5
10,00-15,00	6	8
>15	7	10

Cada alternativa se valora según la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{\sum_{k=1}^7 L_{k,i} \cdot P_k}{\sum_{k=1}^7 P_k} \quad [3]$$

Donde:

$V_i$ , es el valor que se obtiene para la alternativa  $i$  aplicando el criterio de paso por zonas de pendientes.

$L_{k,i}$ , es la longitud en kilómetros lineales para la alternativa  $i$  en el intervalo de pendiente  $k$ ,  $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , ó  $7$ .

$P_k$  es el valor de ponderación dado al intervalo de pendientes  $k$ .

De esta manera, se está dando mayor peso en el impacto ambiental causado, a los intervalos de pendientes por encima del valor máximo aconsejable para cada tipo de infraestructura. Por ejemplo, en el caso de líneas de alta velocidad, ese valor no supera el 1%, asignando  $p=0$  a los terrenos con pendientes por debajo del 1%, al considerar que los movimientos de tierras en ellos van a ser mínimos.

#### 2.1.6. Singularidad de las unidades ambientales afectadas por cada alternativa

Otro criterio para la discriminación entre alternativas es la representatividad territorial o singularidad, medida ésta como la relación entre la superficie de cada unidad ambiental y la superficie total.

$$S_r = S_u / S_T \quad [4]$$

Donde:

$S_r$  = superficie relativa

$S_u$  = superficie de cada unidad

$S_T$  = superficie total

Según este criterio, la afección de una alternativa sobre unidades ambientales de alta o muy alta calidad ambiental es mayor si se efectúa sobre unidades con poca representación superficial.

Por ello, se propone una recalificación de las unidades de calidad ambiental alta que se encuentren poco representadas, cuya valoración pasa a ser muy alta, y realizar de nuevo la comparación entre alternativas en función de la calidad de las alternativas afectadas.

#### 2.1.7. Efecto isla

Con este criterio se pretende evaluar el efecto de fragmentación, basado en la teoría de islas, que puede tener la traza de la obra lineal, al cortar las distintas unidades físicas ya definidas. Es importante resaltar, que en ocasiones, las zonas de contacto entre unidades representan ecotonos de una gran importancia ambiental por diversas razones, ya que en estas zonas de transición se localizan valores máximos de biodiversidad y son las zonas donde se produce mayor tráfico de información ecológica entre las unidades. Para poder utilizar este criterio con propiedad, es imprescindible localizar en la fase de trabajo en campo cuáles son los ecotonos valiosos en cuyo caso la traza no debería pasar por encima de estos ecotonos.

Para el uso de este criterio, se han utilizado los polígonos, clasificados según el mapa de calidad ambiental, como de muy alta (MA) y alta (A) calidad, asumiendo que en unidades de menor calidad ambiental el impacto que se generaría sería menor.

En la intersección de la traza con un polígono cualquiera, se puede dar la casuística indicada en la (Tabla 4).

El primer caso, C1, es el que sufre menor impacto, pues una superficie de dimensiones considerables sólo se vería afectada de manera tangencial.

El segundo caso, C2, la traza genera dos "islas" al cortar al polígono original. La dimensión de esas dos "islas" es todavía lo suficientemente grande como para que el impacto de la división sólo sea moderado.

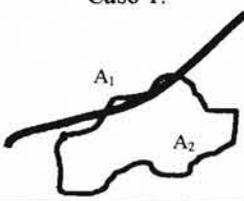
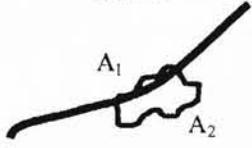
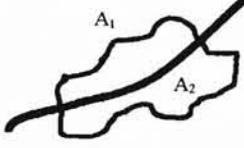
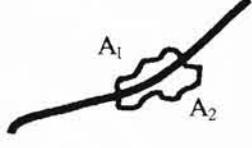
En los casos C3 y C4, la dimensión del polígono  $A_0$  es demasiado pequeña como para absorber las perturbaciones que les produzca el paso de la traza. El caso más grave es el C4, pues supone prácticamente la desaparición del polígono.

Como criterio para establecer el área mínima  $L$ , de tolerancia al paso de la traza, se propone el valor de la mediana de la superficie de los polígonos atravesados, para cada trazado alternativo en estudio. Este valor es más representativo que el del área media, pues los valores de las áreas de los polígonos para cada una de las categorías de calidad ambiental se suelen distribuir de manera muy dispersa.

Para ordenar las distintas alternativas según este criterio,

TABLA 4

Casuística de la intersección de la traza con los polígonos de calidad ambiental

	$A_0 > L$	$A_0 < L$
$\frac{A_1}{A_2} \neq 1$	<p>Caso 1:</p> 	<p>Caso 3:</p> 
$\frac{A_1}{A_2} \cong 1$	<p>Caso 2:</p> 	<p>Caso 4:</p> 

se propone la siguiente ponderación de los distintos casos (Tabla 5).

TABLA 5  
Ponderación de la casuística del "efecto isla"

Coefficiente de ponderación	Caso
10	C1
8	C2
3	C3
1	C4

De esta forma se está dando mayor valor ambiental a la alternativa de trazado que presente mayor número de polígonos en los casos más favorables C1 y C2. La fórmula de ponderación es la siguiente:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^4 P_j \cdot n_{j,i}}{\sum_{j=1}^4 n_{j,i}} \quad [5]$$

Donde:

$V_i$ , es el valor que se obtiene para la alternativa  $i$  aplicando el criterio del efecto isla.

$P_j$ , es el valor de ponderación dado al caso  $j$ .

$n_{j,i}$ , es el número de polígonos del caso  $j$  para la alternativa  $i$ .

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de la calidad ambiental del territorio

La cartografía de síntesis que constituyen las unidades ambientales se valoran mediante dos modelos de la siguiente forma:

I. Valoración de la calidad de la vegetación con los siguientes criterios:

I. Diversidad: entendiéndola como la riqueza en especies diferentes que aparecen en cada tesela de vegetación; es una aproximación al concepto de biodiversidad.

II. Madurez: en función de la fisonomía de la unidad vegetal, es una medida de la biomasa, de tal forma que los

bosques tienen más biomasa que los matorrales, éstos más que los herbazales y así sucesivamente.

III. Naturalidad: entendiéndola como la proximidad a la clímax, es decir a la vegetación potencial de una zona concreta.

2. Valoración de las unidades ambientales con los siguientes criterios:

IV. Calidad de la vegetación dada por el modelo anteriormente explicado.

V. Cuencas visuales internas: desde la traza hacia las unidades adyacentes, en función del relieve y del tipo de vegetación.

VI. Grado de intervención humana: refleja la naturalidad de los paisajes, estableciendo el siguiente gradiente: paisajes con vegetación climática son más naturales que sus etapas seriales de sustitución, éstas más que los cultivos y éstos más que los paisajes con presencia de infraestructuras humanas y que los degradados.

La valoración de cada uno de estos criterios se realiza mediante un proceso de jerarquización, es decir la asignación de una posición en una escala semicuantitativa ordinal al comparar cada una de las unidades ambientales entre sí para cada criterio (Tabla 6).

La tabla anterior se lee a favor del gradiente, en la dirección que marca la flecha. Así por ejemplo: en el criterio VI, cuanto mayor sea el grado de intervención humana menor calidad tendrá el paisaje.

Posteriormente a la valoración de cada unidad, se procede a la realización de un proceso de comparación de unidades mediante técnicas de ordenación vectorial. Para comprobar las posibles correlaciones entre los resultados obtenidos al valorar con ellos diferentes criterios se realiza un test de ordenación de Kendall.

De la aplicación de los tres primeros criterios se obtiene una ordenación de las unidades ambientales en función de la calidad de la vegetación; mientras que la aplicación de los criterios IV, V y VI jerarquizan las unidades ambientales

TABLA 6  
Escala de valoración de los criterios que valoran las unidades ambientales

CRITERIO	← (+) ESCALA DE VALORACIÓN (-)				
	M.A	A	M	B	M.B
I. Diversidad vegetal	M.A	A	M	B	M.B
II. Madurez	M.A	A	M	B	M.B
III. Naturalidad de la vegetación	M.A	A	M	B	M.B
IV. Calidad de la vegetación	M.A	A	M	B	M.B
V. Cuenca Visual	M.A	A	M	B	M.B
VI. Intervención humana	M.B	B	M	A	M.A

Calidad Ambiental M.A: muy alta, A: alta, M: media; B: baja; M.B: muy baja.

en función de su calidad ambiental intrínseca. Si los coeficientes de correlación de Kendall obtenidos resultan significativos, ambos métodos de correlación son equivalentes. En cualquier caso, siempre será preferible utilizar el segundo método de ordenación, ya que contempla la información del primer método recogida de forma implícita en el IV criterio de valoración, además de aportar otros criterios de valoración ambiental.

El resultado del proceso de evaluación es la clasificación del territorio en cinco clases de calidad ambiental: **muy alta; alta; media; baja, y muy baja**. Asumiendo que la calidad ambiental es el mérito para la conservación, se puede, a partir de este momento, elegir como criterio de preferencia la protección de las unidades ambientales de mayor calidad.

### 3.2. Comparación integrada de alternativas de trazado

Mediante la aplicación de los anteriores criterios, se obtiene la ordenación de cada una de las alternativas de trazado en estudio para cada criterio.

Se debe ahora establecer una jerarquización y ponderación de criterios para valorar el impacto ambiental de cada alternativa. Se proponen los siguientes coeficientes de ponderación (Tabla 7).

TABLA 7

Coefficiente de ponderación para cada criterio de evaluación

Criterio	k	Coefficiente de ponderación, P <sub>k</sub>
Unidades singulares	1	10
Zonas protegidas	2	10
Calidad ambiental	3	9
Zonas de pendientes	4	7
Efecto isla	5	6
Singularidad	6	5
Cuencas visuales	7	3

Siguiendo el mismo procedimiento usado para valorar cada alternativa según un criterio particular, el valor global de cada alternativa responderá a la fórmula:

$$T_i = \frac{\sum_{k=1}^7 O_{i,k} \cdot P_k}{\sum_{k=1}^7 P_k} \quad [6]$$

Donde:

$T_i$ , es el valor que se obtiene para la alternativa  $i$ .

$O_{i,k}$ , es el valor de orden para la alternativa  $i$  en el criterio  $k$ .

$P_k$ , es el valor de ponderación dado al criterio de evaluación  $k$ .

La alternativa de trazado que menor valor de  $T$  presente, será la que suponga un menor impacto ambiental para el medio.

## 4. Conclusiones

Los Sistemas de Información Geográfica, resultan ser una herramienta sencilla y potente para la toma de decisiones sobre las alternativas de trazado de las infraestructuras lineales de grandes dimensiones; puesto que permite la integración, de toda la información ambiental disponible de la zona donde se pretende ubicar la obra civil.

La posible carga de subjetividad de los criterios de evaluación y métodos de jerarquización y ponderación, se minimiza al discutir un panel de expertos cada uno de los criterios de valoración de manera independiente, e integrarlos al final del proceso para cada una de las alternativas.

Las principales conclusiones son las siguientes:

1. La extensión del territorio afectado por la traza de una gran infraestructura lineal obliga a la definición de unidades ambientales en base a las características del territorio.

2. Los criterios para la definición de dichas unidades territoriales son:

-Vegetación, caracterizada por su fisonomía y riqueza.

-Presencia de biotopos singulares caracterizados por la presencia de especies endémicas y las relaciones entre ecosistemas.

-Geomorfología del terreno. Amplitud de la cuenca visual.

-Calidad de paisaje. Naturalidad del medio.

-Tipología y calidad de los suelos.

-Presencia de lugares de interés geológico y arqueológico.

3. Una vez definidas las características del territorio, la herramienta y metodología presentadas permiten obtener el grado de afección sobre el territorio de cada una de las alternativas.

Un siguiente paso futuro en el desarrollo de esta herramienta es crear la aplicación específica que permita comparar en tiempo real las implicaciones ambientales de cada alternativa. Esto facultará a los equipos de proyectistas y de técnicos en medioambiente el poder incluir los criterios ambientales en la fase de selección de alternativa de trazado a nivel de anteproyecto, ya que permitiría comprobar cómo evolucionan las variables medioambientales asociadas al territorio, conforme se define la traza de la infraestructura lineal.

## BIBLIOGRAFÍA

(1) Ramos, A. 1979. *Planificación Física y Ecología. Modelos y Métodos*. Ed. EMESA

(2) Borrough y McDonell. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.

(3) Eckenrode, R. T. 1965. *Weighing multiple criteria*. Management Science. 12, 3, 180-192.

(4) Margalef, R. 1992. *Planeta azul, planeta verde*. ed. Blume. Barcelona.

(5) FAO, 1977. *Guía para la descripción de perfiles*. Roma 60.

(6) Suárez, F. 1988. *Guía para la elaboración de Estudios de*

*Impacto Ambiental en Carreteras* Monografías del MOPU. Madrid.

(7) Casermeiro, M. A., García-Montero, I. G. y Sobrini, I. *Evaluación de Impacto Ambiental. Generalidades*. En Avances en Evaluación de Impacto Ambiental y Ecoauditoría. 1, 21-36. Peinado, M. y Sobrini, I. Ed. Trotta. Madrid.

(8) García-Montero, L. G., Casermeiro, M. A. y Sobrini, I. 1997. *El estudio del paisaje en la planificación física del trazado de una línea ferroviaria de alta velocidad*. En Avances en Evaluación de Impacto Ambiental y Ecoauditoría. 1, 423-435. Peinado, M. y Sobrini, I. Ed. Trotta. Madrid.

(9) Otero, I, Monzón, A., Casermeiro, M. A., García, M. y Cangas, J. L. 1999. *Carretera y Medio Ambiente. Evaluación de Impacto Ambiental y Restauración*. Madrid.

\*\*\*

## publicaciones del IETCC/CSIC

**Modelos reducidos. Método de cálculo**

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Proyectista.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

**Cemento blanco**

Julian Rezola  
Ingeniero Químico Dipl. I. O. S.

Sabido es que existe una extensa y documentada bibliografía sobre el cemento gris; en cambio, no puede decirse lo mismo acerca del cemento portland blanco, ya que los escritos existentes se refieren tan sólo a algunas peculiaridades que le distinguen de aquél.

El autor nos ofrece sus profundos conocimientos y su larga experiencia tanto en laboratorio como en fabricación.

La parte descriptiva del libro se complementa con gráficos, diagramas y fotografías de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicación apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cartón policerado, de 17,4 x 24,3 cm, compuesto de 395 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos.

**La presa bóveda de Susqueda**

A. Rebollo,  
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un emplazo. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de 18 x 24,5 cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.