

# Trabajo Fin de Máster

## *Análisis de la evolución del uso del suelo mediante un indicador ambiental basado en técnicas GIS. Aplicación en vertederos de residuos sólidos urbanos de la Comunidad Valenciana*

**Intensificación:** *ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS*

**Autora:**

*Davinia Calvo Mas*

**Tutora:**

*María Elena Rodrigo Clavero*

**Directora experimental:**

*Claudia Patricia Romero Hernández*

*JUNIO, 2021*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis de la evolución del uso del suelo mediante un indicador ambiental basado en técnicas GIS. Aplicación en vertederos de residuos sólidos urbanos de la Comunidad Valenciana

**Título del TFM en inglés:** Analysis of the evolution of land use through an environmental indicator based on GIS techniques. Application in municipal solid waste landfills in the Valencian Region

**Título del TFM en valenciano:** Anàlisi de l'evolució de l'ús del sòl mitjançant un indicador ambiental basat en tècniques GIS. Aplicació en abocadors de residus sòlids urbans de la Comunitat Valenciana

**Alumno:** Davinia Calvo Mas

**Tutor:** María Elena Rodrigo Clavero

**Director experimental:** Claudia Patricia Romero Hernández

**Fecha de Lectura:**

### Resumen

#### En español

En los últimos años, los indicadores ambientales se han convertido en una herramienta fundamental en la evaluación y seguimiento ambiental, influyendo significativamente en la gestión ambiental y en el desarrollo de normativas legales. Los indicadores ambientales proporcionan, de una manera simplificada y útil, información integrada procedente de numerosas fuentes.

El uso del suelo es una de las principales causas de transformación de los ecosistemas terrestres. Muchos problemas ambientales tienen su origen en el cambio de uso del suelo, que puede llegar a afectar al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación de aguas, suelos y aire.

El uso del suelo en las cercanías de los vertederos de residuos sólidos urbanos puede verse fuertemente alterado por las tareas de gestión de residuos (transporte, vertido y cierre). Los efectos se extienden desde las fases previas a la construcción del vertedero hasta años posteriores a la finalización del proceso de relleno en áreas ubicadas más allá del perímetro de la parcela ocupada por esta infraestructura.

En este trabajo se estudia el cambio de uso del suelo en las proximidades de dos vertederos de residuos sólidos urbanos de la Comunidad Valenciana a lo largo del tiempo mediante el índice ambiental WEI (Weighted Environmental Index). El índice ambiental WEI se basa en el uso de técnicas de análisis espacial, mediante GIS, con datos procedentes del Sistema Español de Información sobre Ocupación de la Tierra (SIOSE) que integran la información sobre el uso y cobertura del suelo en una escala detallada y extensa. El índice ambiental WEI asigna valores ambientales al uso del suelo en función del grado de intervención antropogénica y su superficie

de ocupación. En esta investigación se realiza un análisis estadístico multitemporal georreferenciado considerando los valores del WEI previamente asignados a cada uso del suelo.

Los resultados demuestran la aplicación del WEI a estudios de casos reales y la importancia de integrar el análisis estadístico de la evolución del WEI a lo largo del tiempo para llegar a una mejor comprensión de los procesos socioeconómicos y ambientales que inducen el cambio de uso de suelo.

### **En valenciano**

En els últims anys, els indicadors ambientals s'han convertit en una eina fonamental en l'avaluació i seguiment ambiental, influint significativament en la gestió ambiental i en el desenvolupament de normatives legals. Els indicadors ambientals proporcionen, d'una manera simplificada i útil, informació integrada procedent de nombroses fonts.

L'ús del sòl és una de les principals causes de transformació dels ecosistemes terrestres. Molts problemes ambientals tenen el seu origen en el canvi d'ús del sòl, que pot arribar a afectar el canvi climàtic, la pèrdua de biodiversitat i la contaminació d'aigües, sòls i aire.

L'ús del sòl en la rodalia dels abocadors de residus sòlids urbans pot veure's fortament alterat per les tasques de gestió de residus (transport, abocament i tancament). Els efectes s'estenen des de les fases prèvies a la construcció de l'abocador fins a anys posteriors a la finalització del procés de farciment en àrees situades més enllà del perímetre de la parcel·la ocupada per aquesta infraestructura.

En aquest treball s'estudia el canvi d'ús del sòl en les proximitats de dos abocadors de residus sòlids urbans de la Comunitat Valenciana al llarg del temps mitjançant l'índex ambiental WEI (Weighted Environmental Index). L'índex ambiental WEI es basa en l'ús de tècniques d'anàlisi espacial, amb GIS y amb dades procedents del Sistema Espanyol d'Informació sobre Ocupació de la Terra (SIOSE) que integren la informació sobre l'ús i cobertura del sòl en una escala detallada i extensa. L'índex ambiental WEI assigna valors ambientals a l'ús del sòl en funció del grau d'intervenció antropogènica i la seua superfície d'ocupació. En aquesta investigació es realitza una anàlisi estadística multitemporal georreferenciat considerant els valors del WEI prèviament assignats a cada ús del sòl.

Els resultats demostren l'aplicació del WEI a estudis de casos reals i la importància d'integrar l'anàlisi estadística de l'evolució del WEI al llarg del temps per a arribar a una millor comprensió dels processos socioeconòmics i ambientals que indueixen el canvi d'ús de sòl.

### **En inglés**

In recent years, environmental indicators have become a fundamental tool in environmental evaluation and monitoring, significantly influencing environmental management and the development of legal regulations. Environmental indicators provide, in a simplified and useful way, integrated information from many sources.

Land use is one of the main causes of transformation of terrestrial ecosystems. Many environmental problems have their origin in the change of land use, which can affect climate change, the loss of biodiversity and the pollution of water, soil and air.

Land use near municipal solid waste landfills can be strongly altered by waste management tasks (transport, dumping and closure). The effects extend from the phases prior to the construction of the landfill to years after the completion of the filling process in areas located beyond the perimeter of the parcel occupied by this infrastructure.

This work studies the change in land use near two municipal solid waste landfills in the Valencian Region over time using the WEI (Weighted Environmental Index). The WEI environmental index is based on the use of spatial analysis techniques (GIS), with data from the Spanish Land Occupation Information System (SIOSE) that integrate information on land use and land cover on a detailed and extensive scale. The WEI environmental index assigns environmental values to land use based on the degree of anthropogenic intervention and its area of occupation. In this research, a georeferenced multitemporal statistical analysis is carried out considering the WEI values previously assigned to each land use.

The results demonstrate the application of the WEI to real case studies and the importance of integrating the statistical analysis of the evolution of the WEI over time to reach a better understanding of the socioeconomic and environmental processes that induce land use change.

**Palabras clave español:** indicador ambiental, uso del suelo, GIS, vertederos

**Palabras clave valenciano:** indicador ambiental, ús del sòl, GIS, abocadors

**Palabras clave inglés:** environmental indicator, land use, GIS, landfills

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
2.	ESTADO DEL ARTE. INDICADORES E ÍNDICES.....	3
2.1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.2.	DEFINICIÓN DE INDICADOR.....	3
2.3.	LA FUNCIÓN DE LOS INDICADORES Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	5
2.4.	TIPOS DE INDICADORES.....	7
2.5.	SISTEMAS DE INDICADORES.....	9
2.6.	ÍNDICES.....	10
2.7.	INDICADORES AMBIENTALES .....	12
2.7.1.	Introducción.....	12
2.7.2.	El concepto de indicador ambiental.....	13
2.7.3.	Los sistemas de indicadores ambientales.....	15
2.8.	ÍNDICES AMBIENTALES .....	23
3.	USO DEL SUELO. PROYECTO SIOSE.....	25
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	25
3.1.1.	Descripción de las técnicas de cartografía con GIS.....	25
3.1.2.	Corine Land Cover .....	25
3.1.3.	SIOSE.....	25
3.2.	LA OCUPACIÓN DEL SUELO .....	26
3.3.	PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN DE OCUPACIÓN DEL SUELO EN ESPAÑA (SIOSE) .....	28
4.	ÍNDICE WEI (WEIGHTED ENVIRONMENTAL INDEX).....	35
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	35
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL WEI. ESQUEMA CONCEPTUAL .....	35
5.	APLICACIÓN PRÁCTICA. EVOLUCIÓN DEL USO DEL SUELO EN LAS PROXIMIDADES DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	43
5.1.	INTRODUCCIÓN .....	43

---

5.2.	LOCALIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ANALIZADOS.....	43
5.3.	APLICACIÓN DEL WEI AL VERTEDERO DE ALGIMIA DE ALFARA.....	46
5.4.	APLICACIÓN DEL WEI AL VERTEDERO DE VILLENA.....	52
5.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.....	57
5.5.1.	Introducción.....	57
5.5.2.	Vertedero de Algimia de Alfara.....	58
5.5.3.	Vertedero de Villena.....	63
6.	CONCLUSIONES .....	69
7.	LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN .....	71
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1.- Interrelación entre indicadores de resultados y jerarquía.....	9
Figura 2.2.- Proceso de elaboración de índices.....	10
Figura 2.3.- Pirámide de la información .....	14
Figura 2.4. Modelo PER .....	16
Figura 2.5.- Modelo FPEIR .....	17
Figura 2.6.- Jerarquía de la información ambiental .....	22
Figura 3.1.- Ejemplo de clasificación utilizando un sistema de modelación jerárquica de datos y el Sistema de Información de Ocupación (SIOSE) .....	26
Figura 3.2.- Actualización del SIOSE .....	28
Figura 3.3.- Polígonos SIOSE.....	30
Figura 3.4.- Esquema general de la organización del proyecto .....	31
Figura 4.1.- Valores del WEI en la Comunidad Valenciana en 2005, 2009 y 2015 .....	41
Figura 4.2.- Diferencias del WEI entre 2005 y 2015 en la Comunidad Valenciana.....	42
Figura 5.1.- Planes Zonales de residuos de la Comunidad Valenciana .....	44
Figura 5.2.- Localización de los vertederos de Algimia de Alfara y Villena .....	45
Figura 5.3.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2005 .....	47
Figura 5.4.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2009.....	48
Figura 5.5.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2015 .....	50
Figura 5.6.- Diferencias del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara entre los años 2005 y 2015 .51	
Figura 5.7.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2005 .....	53
Figura 5.8.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2009 .....	54
Figura 5.9.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2015 .....	55
Figura 5.10.- Diferencias del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara entre los años 2005 y 2015	56
Figura 5.11.- Resultados proporcionados por el GIS para un año determinado .....	57
Figura 5.12.- Determinación del valor del WEI para la zona de estudio.....	58
Figura 5.13.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara .....	58
Figura 5.14.- Funciones de distribución acumulada del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara.....	60
Figura 5.15.- Evolución de los deciles del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara.....	61
Figura 5.16.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2005-2009. Vertedero de Algimia de Alfara .....	61
Figura 5.17.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfara .....	62

---

Figura 5.18.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfara .....	62
Figura 5.19.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Villena .....	63
Figura 5.20.- Funciones de distribución acumulada del WEI. Vertedero de Villena .....	65
Figura 5.21.- Evolución de los deciles del WEI. Vertedero de Villena.....	66
Figura 5.22.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2005-2009. Vertedero de Villena .....	67
Figura 5.23.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Villena .....	68
Figura 5.24.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfara .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Características de los indicadores.....	7
Tabla 2.2.- Ventajas y desventajas de indicadores compuestos.....	12
Tabla 2.3.-. Indicadores clasificados en Áreas de Interés Ambiental .....	18
Tabla 2.4.-Indicadores ambientales de la OCDE.....	19
Tabla 2.5.- Indicadores ambientales de la AEMA.....	20
Tabla 2.6.- Sistema Español de Indicadores Ambientales.....	23
Tabla 4.1.- Valores básicos de los factores de evaluación ( $F_i$ ) para cada uso del suelo considerado por el SIOSE y valor final del Índice Ambiental Ponderado para un polígono de un solo uso ( $WEI_k$ ).....	38
Tabla 4.2.- Valor ambiental en función del rango del WEI.....	40
Tabla 5.1.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara .....	59
Tabla 5.2.- Deciles de la función de distribución del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara .....	59
Tabla 5.3.- Diferencias entre los deciles de la función de distribución. Vertedero de Algimia de Alfara .....	60
Tabla 5.4.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Villena.....	63
Tabla 5.5.- Deciles de la función de distribución del WEI. Vertedero de Villena .....	64
Tabla 5.6.- Diferencias entre los deciles de la función de distribución. Vertedero de Villena.....	65



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los cambios que sufre el medioambiente son provocados, fundamentalmente, por las actividades humanas, que pueden dañar los ecosistemas y afectar al desarrollo sostenible. La explotación incontrolada de recursos naturales, como la tierra y el agua, ponen en peligro la utilización continua de estos recursos. Además, la industrialización ha provocado cambios globales en los ciclos naturales. La concienciación con respecto a esta degradación ambiental se ha desarrollado en el último medio siglo, lo que ha llevado al concepto de sostenibilidad ambiental, uno de los tres pilares tradicionales de la sostenibilidad (económica, social y ambiental).

En este contexto, los indicadores ambientales han surgido como herramientas para controlar y gestionar el estado del medio ambiente. Los indicadores ambientales se utilizan para simplificar el seguimiento de sistemas ecológicos complejos y se componen de variables objetivas y cuantificables que informan sobre aspectos específicos del medio, como el número de especies amenazadas o la presencia de contaminantes atmosféricos [1].

En las últimas décadas, el uso de indicadores ambientales se ha vuelto omnipresente en los ámbitos público, político y científico. Los indicadores ofrecen información para tomar decisiones y gestionar las políticas ambientales. Se podría decir, que los indicadores ambientales están de moda. En cualquier informe reciente sobre el estado del medio ambiente aparece algún indicador que hace referencia a una tendencia, cambio o interpretación. Los informes publicados por organizaciones ambientales globales, nacionales y locales utilizan indicadores para proporcionar una fácil comprensión de los problemas y preocupaciones ambientales.

Uno de los factores ambientales que se ve afectado por las acciones humanas es el uso del suelo, cuyo cambio presenta implicaciones para la biodiversidad, los valores de los ecosistemas, la escorrentía superficial, el valor del suelo, entre otros aspectos. Las consecuencias de los cambios en el uso del suelo son diversas y pueden afectar a la capacidad productiva general de la tierra para mantener el suministro futuro de servicios ambientales y productos primarios a las economías [2].

El seguimiento del cambio de uso de suelo es actualmente más sencillo, ya que se dispone de herramientas de teledetección mediante satélites. De esta forma, se puede disponer de grandes bases de datos oficiales que permiten controlar el estado ambiental basado en el uso del suelo.

Por su parte, la gestión de residuos se presenta como una de las actividades con más impacto en el medio ambiente. La localización de vertederos genera mucha controversia y puede llegar a afectar al territorio colindante. Mediante el empleo de indicadores basados en el uso del suelo, se puede estudiar la afección de estas infraestructuras sobre el territorio.

En este marco de trabajo, los objetivos de este Trabajo Fin de Máster son:

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de los indicadores e índices existentes que sean especialmente de aplicación en el campo medioambiental.
- Analizar la aplicabilidad del índice ambiental WEI (*Weighted Environmental Index*), basado en el cambio de uso del suelo, a problemas relacionados con vertederos de residuos sólidos.
- Aplicar el índice WEI al análisis de la evolución del uso del suelo en las proximidades de dos vertederos de residuos sólidos urbanos de la Comunidad Valenciana.

El presente documento se estructura en los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1 se introduce la importancia de los indicadores en la evaluación del medio ambiente, los objetivos del trabajo y la estructura del documento.
- El capítulo 2 presenta el estado del arte, la base teórica en la que se sustenta el estudio de los indicadores e índices.
- En el capítulo 3 se describe el proyecto SIOSE, que sirve de base de datos para el análisis del cambio de uso del suelo.
- El capítulo 4 recoge la descripción del índice ambiental WEI.
- En el capítulo 5 se describe la aplicación práctica del WEI a los vertederos de Algimia de Alfara y Villena.
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.
- En el capítulo 7 se apuntan distintas líneas de futura investigación.
- En el capítulo 8 se presentan las referencias utilizadas para la redacción de Trabajo Fin de Máster.

## **2. ESTADO DEL ARTE. INDICADORES E ÍNDICES**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Hoy en día, los indicadores se producen y utilizan en todo el mundo, en todos los niveles y sectores de la sociedad, por actores públicos, privados y de la sociedad civil y para una variedad de propósitos que abarcan desde la provisión de conocimientos hasta el control administrativo.

Si bien el uso de datos cuantitativos como apoyo de políticas tiene una larga historia, las últimas décadas han visto el nacimiento de lo que algunos han llamado una “industria de indicadores” [3], centrada especialmente en la producción de indicadores ambientales y de sostenibilidad, dentro de un marco denominado de diversas formas: “gobernanza por números” [4], “gestión por números” en el servicio público [5] o “discurso de números” [4]. En general, se espera que los indicadores mejoren la racionalidad de la formulación de políticas y el debate público, ya que se supone que proporcionan una base de información más objetiva, sólida y confiable. Los indicadores pueden operar como "objetos límite" [6], atendiendo tanto a los ideales tecnocráticos como a los puramente políticos, combinando hechos concretos y modelando con el razonamiento colectivo y la especulación. Por lo tanto, los indicadores obtienen gran parte de su poder al ser percibidos como información exacta, científica y objetiva, por un lado, y como un tipo de evidencia relevante para las políticas, hecha a medida y, por lo tanto, en parte subjetiva, por el otro.

Los antecedentes de la proliferación continua de indicadores se pueden rastrear hasta el desarrollo de indicadores económicos, sobre todo el del Producto Interior Bruto (PIB), después de la Gran Depresión, y su adopción mundial después de la Segunda Guerra Mundial [7], [8]. En un sentido más amplio, los orígenes de los indicadores se remontan al trabajo de los "reformadores sociales" en Bélgica, Francia, Inglaterra y Estados Unidos en la década de 1830 [9]. Las olas posteriores incluyeron la aparición de indicadores sociales en las décadas de 1960 y 1970 [9], [10], indicadores de ciencia, tecnología e innovación (CTI) en la década de 1950 [7]; y, desde la década de 1980, indicadores de gestión del desempeño, como un elemento esencial de la nueva gestión pública y la política basada en la evidencia [4], [5].

Desde la década de 1970, las oficinas nacionales de estadística y las organizaciones internacionales, especialmente la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), han sido pioneros en el desarrollo de indicadores ambientales y de recursos naturales, destinados a respaldar la presentación de informes sobre el “estado del medio ambiente”, diferentes tipos de evaluación, acuerdos ambientales multilaterales y el desarrollo de instrumentos de política ambiental [11]. Los desarrollos más recientes incluyen la evolución de los indicadores ambientales hacia enfoques interdisciplinarios e intersectoriales [10], la introducción de indicadores de desarrollo sostenible en varios niveles de gobernanza y la proliferación de varios indicadores compuestos de sostenibilidad, progreso social y bienestar [12], [13].

### **2.2. DEFINICIÓN DE INDICADOR**

Según la Real Academia Española, “indicador” es un adjetivo que “indica o sirve para indicar”, mientras que “indicar” se define como “mostrar o significar algo con indicios y señales” e “indicio”

como “fenómeno que permite conocer o inferir la existencia de otro no percibido”. Por tanto, es razonable pensar que un indicador lleva implícito algo que no se percibe.

Existen gran cantidad de definiciones del concepto "indicador", ya que no existe una definición por parte de organismos nacionales o internacionales que pueda considerarse oficial. A continuación, se recoge una serie de definiciones de “indicador” según diversos autores.

En [14], se define un indicador como una “medida de la parte observable de un fenómeno que permite evaluar otra parte no observable de ese mismo fenómeno”. En [15], se señala que un indicador es la “forma más sencilla de reducir una gran cantidad de datos, conservando información esencial para responder a las preguntas planteadas por los datos”.

Según [16], el indicador es una variable empírica que permite inferir el comportamiento de una variable especulativa. Se refiere a datos, esencialmente cualitativos, que nos permiten darnos cuenta de cómo se encuentran las cosas en relación con algún aspecto de la realidad que nos interesa conocer.

Otros autores describen un indicador como “algo que proporciona una pista sobre un tema de mayor importancia o que hace que una tendencia o fenómeno se note que no es inmediatamente detectable” [17].

Los indicadores suelen ser un compromiso entre la precisión científica y la información disponible. Algunos investigadores se inclinan por la definición de “indicador” desde la visión de la teoría de sistemas, que define los indicadores como variables (y no valores), es decir, “representaciones operativas de un atributo que se definen en términos de un procedimiento de medición u observación determinada” [18].

De acuerdo con [19], valoramos lo que nos preocupa y, por tanto, los indicadores son una expresión de valor. En este sentido, los indicadores esenciales no son obvios. Aprender a manejar un sistema complejo a través de indicadores implica aprender a reconocer un conjunto específico de ellos, y evaluar cuál es el estado actual, la salud o la viabilidad del sistema. A menudo, el aprendizaje de los indicadores es intuitivo, informal y subconsciente. Algunas veces en cambio, los indicadores esenciales son identificados por un proceso de prueba y error, con base en nuestro modelo mental del sistema y de sus procesos.

Un indicador es un “parámetro, o un valor derivado de parámetros, que indican o proporcionan información acerca de, o describen el estado de un fenómeno/ambiente/área, con significado que va más allá de la que se asocia directamente al valor del parámetro”. Desde el punto de vista de su función, los indicadores condensan la enorme complejidad de nuestro entorno en una cantidad manejable de información, en un pequeño subconjunto de observaciones que permita apreciar mejor su significado, obteniendo información importante para la toma de decisiones y para orientar nuestras acciones [20].

Matemáticamente, un indicador se define como una función de una o más variables que miden conjuntamente una característica o atributo de los individuos en estudio [21]. Por otro lado, en [22] los indicadores se definen como piezas de información que resumen las características de un sistema o resaltan lo que está sucediendo en el sistema.

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, un indicador es “una medida, por lo general cuantitativa, que puede utilizarse para ilustrar y comunicar fenómenos complejos de manera sencilla, incluyendo las tendencias y avances en el curso del tiempo” [23].

También se puede considerar como un “signo, típicamente medible, que puede reflejar una característica cuantitativa o cualitativa, y que es relevante para hacer juicios sobre condiciones del sistema actual, pasado o predicciones sobre el futuro” [24].

La definición de [25] es ampliamente utilizada en la literatura: “los indicadores son estadísticas, series estadísticas o cualquier forma de indicación que nos facilite estudiar dónde estamos y hacia dónde vamos con respecto a ciertos objetivos y metas, así como evaluar programas específicos y determinar su impacto”.

En términos generales, se podría decir que un indicador no es más que una estadística que nos ofrece información más allá del dato mismo, permitiendo un mejor conocimiento de la realidad que pretendemos analizar. El aspecto más importante de los indicadores, en comparación con otras formas de información, es su relevancia para la toma de decisiones (políticas, empresariales, personales). Los indicadores son variables que resumen o de alguna manera simplifican información relevante, vuelven visibles o perceptibles fenómenos de interés y cuantifican, miden y comunican datos importantes.

### **2.3. LA FUNCIÓN DE LOS INDICADORES Y SUS CARACTERÍSTICAS**

Según [20], los indicadores nos ayudan a conectar con nuestro entorno, ya que recogen y resumen la complejidad de éste en una cantidad de información asumible, en un conjunto de observaciones que proporcionan la información suficiente y más importante para poder tomar decisiones y orientar políticas

En [19], se reconoce a los indicadores como una expresión de valor, ya que valoramos aquello que nos preocupa. Esto nos da una idea de que elegir los indicadores esenciales no es una tarea obvia: comprender y guiar un sistema complejo mediante indicadores significa disponer de un conjunto adecuado de indicadores que permita evaluar el estado actual del sistema. Llegar a dicho conjunto requiere de un aprendizaje que, a veces, es azaroso o depende de la intuición. En otras ocasiones, se identifican los indicadores esenciales siguiendo el método de prueba y error.

Las funciones básicas que debe proporcionar un indicador son las siguientes [26]:

- **Simplificación:** el sistema en el que actuamos es multidimensional y el indicador sólo puede tener en cuenta alguna de esas dimensiones (economía, sociedad, medioambiente, política, ...)
- **Cuantificación:** se puede comparar en el tiempo el estado actual del sistema, y también se pueden realizar comparaciones entre varios sistemas.
- **Comunicación:** los indicadores deben ser capaces de transmitir información valiosa sobre un determinado aspecto que ayude en la toma de decisiones

Es decir, los indicadores deben representar la realidad de forma empírica reduciendo sus componentes. Además, deben ser capaces de medir cuantitativamente el fenómeno que representan, estableciendo

una escala para ello. Por último, cada indicador se ha de utilizar para transmitir información sobre el objeto particular de estudio.

Por ejemplo, la variación del Producto Interior Bruto (PIB) es un indicador de uso común en economía. Se trata de un buen indicador, ya que sigue las tres funciones anteriores: simplifica (sólo con un número puede mostrar si el valor de bienes y servicios de una economía ha disminuido o aumentado en un periodo determinado de tiempo, midiéndolo mediante el cambio porcentual), cuantifica (permite la comparación con datos de referencia, como medias nacionales de otros años) y comunica (a la vista de su valor, se puede determinar si una determinada economía presenta aceleración, recesión económica, etc.)

Otras funciones de los indicadores son [16]:

- Evaluar condiciones relacionadas con los objetivos a diferentes escalas
- Comparar países y/o regiones
- Pronosticar tendencias
- Advertir de información sensible
- Predecir impactos de acciones
- Determinar la eficacia en la aplicación de programas

Sin embargo, aunque los indicadores presentan múltiples funciones y se han convertido en un importante instrumento de gestión, en [27] se advierte que los indicadores pueden ser peligrosos si son la única fuente de información en el proceso de toma de decisiones, pudiendo además ser parciales de forma deliberada o accidental. Si se elige de forma incorrecta un indicador del estado del sistema, o es inexacto, no está actualizado o presenta sesgo, las decisiones derivadas a partir de dicho indicador pueden ser ineficaces. Por tanto, es necesario e importante extremar las precauciones en el proceso de selección de indicadores, atendiendo a las fuentes de información, presentación, unidades de medida y escala.

Existen diferentes conjuntos de características que deben cumplir los indicadores para poder ser utilizados de forma oficial. La tabla 2.1 muestra las características propuestas por el Ministerio de Medio Ambiente, cuando se comenzó a trabajar en un sistema de indicadores para España [28].

Tabla 2.1.- Características de los indicadores

<b>Características de los indicadores</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Validez científica: el indicador ha de estar basado en el conocimiento científico del sistema, teniendo atributos y significados fundamentados.</li><li>• Representatividad: la información que posee el indicador debe de ser representativa.</li><li>• Sensibilidad a los cambios: el indicador debe señalar los cambios de tendencia preferiblemente a corto y medio plazo.</li><li>• Fiabilidad de los datos: los datos deben de ser lo más fiables posible.</li><li>• Relevancia: el indicador debe proveer información de relevancia para poder determinar objetivos y metas.</li><li>• Comprensible: el indicador debe de ser simple, claro y de fácil comprensión para los que vayan a hacer uso del mismo.</li><li>• Predictivo: el indicador ha de proveer señales de alarma previa de futuros cambios en términos como el ecosistema, la salud, la economía etc.</li><li>• Metas: el indicador ideal propone metas a alcanzar, con las que comparar la situación inicial.</li><li>• Comparabilidad: el indicador debe ser prestado de tal forma que permita comparaciones interterritoriales.</li><li>• Cobertura geográfica: el indicador ha de basarse en temas que sean extensibles a escala del nivel territorial de análisis.</li><li>• Coste-Eficiencia: el indicador ha de ser eficiente en términos de coste de obtención de datos y de uso de la información que aporta.</li></ul>

## 2.4. TIPOS DE INDICADORES

Se pueden encontrar cuatro tipos de indicadores comunes en la teoría general sobre indicadores [29]:

### 1. Según medición

- a. Indicadores cuantitativos: que representan de forma numérica la realidad. Lo más característico de este tipo de indicador es que valores diferentes pueden ordenarse y compararse. Por ejemplo, promedio de ejemplares de una especie determinada a lo largo de varios años.
- b. Indicadores cualitativos: permiten considerar la heterogeneidad del sistema, así como sus fortalezas y debilidades. También permiten evaluar la gestión del sistema estudiado. La característica fundamental de este tipo de indicador es que presenta escalas de cualidades: indicadores categóricos (bueno, regular, malo), indicadores binarios (sí, no)

### 2. Según nivel de intervención

- a. Indicadores de impacto: valoran los efectos de los programas aplicados a medio y largo plazo, que repercuten en el sistema en conjunto. Por ejemplo, el PIB, la tasa de paro.

- b. Indicadores de resultado: hacen referencia a los efectos de una acción determinada. Por ejemplo, porcentaje de viviendas conectadas a la red de abastecimiento de agua potable.
  - c. Indicadores de producto: cantidad y calidad de bienes y/o servicios generados por las actividades de un programa. Por ejemplo, número de tomas de agua por cada 1000 habitantes
  - d. Indicadores de proceso: seguimiento de actividades, respecto de recursos, personal y/o presupuesto. Por ejemplo, tiempo de espera en hospitales.
  - e. Indicadores de recurso: seguimiento de la totalidad de recursos disponibles y utilizados. Por ejemplo, gasto en atención hospitalaria
3. Según jerarquía
- a. Indicadores de gestión: o indicadores internos. Se utilizan al comienzo de la actividad programada, y miden la relación entre los recursos y los procesos. Por ejemplo, indicadores administrativos.
  - b. Indicadores estratégicos: evalúan los productos, efectos e impactos, es decir, la forma, técnica, propuestas y soluciones del sistema en estudio.
4. Según calidad
- a. Indicadores de eficacia: indican si un programa ha alcanzado sus objetivos. Por ejemplo, número de viviendas de protección social construidas al final de un año en relación a las proyectadas.
  - b. Indicadores de eficiencia: establecen relaciones de productividad en función del uso de recursos.
  - c. Indicadores de efectividad: mide el impacto de nuestros productos en el objetivo, relacionando la eficiencia y la eficacia.

Las tipologías según nivel de resultados y jerarquía se complementan, tal como se muestra en la figura 2.1.

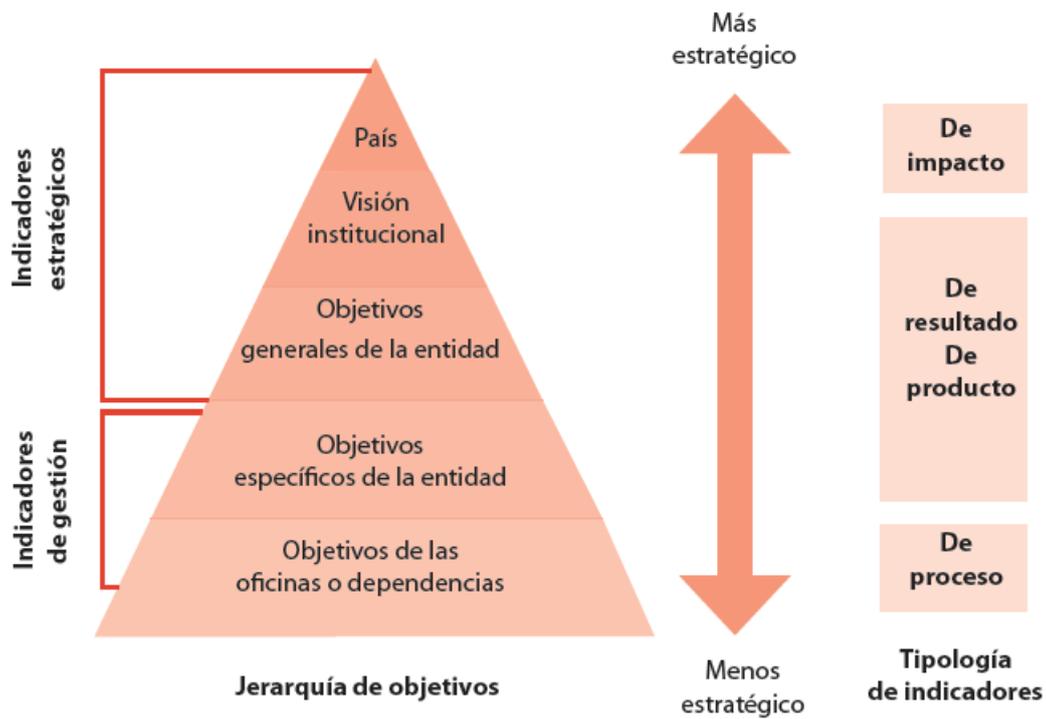


Figura 2.1.- Interrelación entre indicadores de resultados y jerarquía

## 2.5. SISTEMAS DE INDICADORES

Ya ha quedado de manifiesto que los sistemas (sociales, económicos, ambientales) presentan una estructura compleja, necesitando mucha información (datos, variables, parámetros) para poder ser descritos de forma apropiada. Los indicadores surgen como herramienta que sintetiza la información disponible sobre dichos sistemas. Sin embargo, un solo indicador no puede describir todas las relaciones que ocurren dentro del sistema, por lo que es necesario disponer de un conjunto de indicadores que expliquen de forma global el sistema a analizar [30].

Los sistemas de indicadores no son una recopilación de indicadores aleatorios, sino que deben satisfacer determinadas propiedades adicionales [31]:

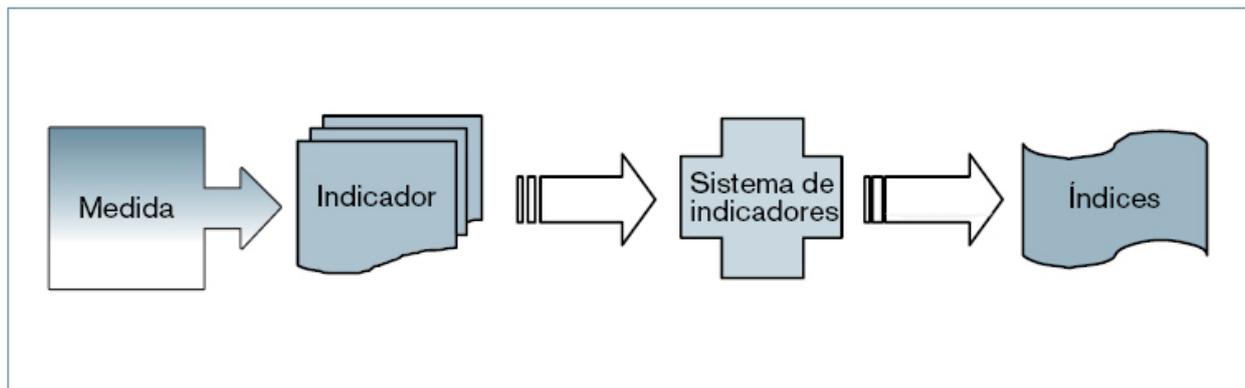
- **Completitud:** el sistema de indicadores debe reflejar todo el sistema objeto de estudio, siendo cada indicador representante de una parte del sistema.
- **Pertinencia:** tanto los indicadores como el sistema deben ser pertinentes.
- **Simplicidad:** el número de indicadores debe ser lo más pequeño posible y también deben ser simples.
- **Precisión:** el sistema de indicadores no puede generar ambigüedad.
- **Utilidad:** el sistema de indicadores ha de responder a los intereses buscados, siendo un apoyo en la toma de decisiones.
- **Aceptación:** los agentes implicados en su utilización deben participar en el diseño de los sistemas de indicadores.

Hay que tener en cuenta que un sistema de indicadores no es sólo un simple conjunto de indicadores aleatorios, sino que deben responder a un interés concreto, proporcionando información que es mayor y distinta a la que puede ofrecer cada uno de sus componentes individuales [32].

La principal ventaja de un sistema de indicadores es la capacidad de organizar información, de forma que pueden establecerse relaciones entre las diferentes variables y proporcionar una interpretación conjunta. Sin embargo, es importante la selección de las variables relevantes, ya que un fenómeno concreto puede abordarse de múltiples maneras y, por lo tanto, son muchos los indicadores simples que podrían servir para estudiarlo.

## 2.6. ÍNDICES

Se suelen distinguir dos tipos de indicadores: los indicadores simples, a los que se ha hecho referencia en apartados anteriores y los indicadores complejos o sintéticos, también llamados índices. Esta clasificación depende de la información contenida en cada indicador y de si está más o menos elaborada o combinada (figura 2.2).



*Figura 2.2.- Proceso de elaboración de índices  
(Castro, 2004)*

En el caso de los indicadores simples, la información procede de estadísticas reales o con un tratamiento simple de los datos. Los indicadores sintéticos o índices, en cambio, son valores adimensionales que aparecen al combinar varios indicadores sencillos a través de una ponderación y teniendo en cuenta una jerarquía en sus componentes [33].

La información que puede proporcionar cada uno de los dos tipos de indicadores es distinta y serán de utilidad en función del nivel al cual se trabaje. Los indicadores simples se utilizan fundamentalmente para detectar impactos específicos y poder aplicar soluciones concretas. Los índices proporcionan una mejor comprensión del sistema a estudiar, pero requiere de una interpretación de los resultados mucho más exhaustiva y complicada.

Los sistemas de indicadores se encontrarían entre los dos tipos de indicadores, consistiendo como ya se ha comentado en un conjunto de indicadores sencillos cuyos resultados deben interpretarse de forma conjunta.

Los indicadores compuestos o índices son una combinación matemática de un conjunto de indicadores simples que resumen un concepto multidimensional en un índice simple o unidimensional basado en un modelo conceptual subyacente [34].

Algunos conjuntos de indicadores ambientales, por ejemplo, se pueden reducir a un índice, un número que sintetiza aún más la medida de sostenibilidad ambiental o el estado ambiental de un determinado sistema [35].

De manera similar, en [36] los índices se definen como combinaciones matemáticas de indicadores simples que no tienen una unidad de medida común.

El número de índices crece cada año, y se aplican en diferentes áreas de interés, ya que tienen la capacidad de explicar conceptos complejos [36]. La Unión Europea y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos son organizaciones pioneras en el desarrollo de iniciativas relacionadas con estos conceptos en diferentes campos de estudio (innovación/tecnología, sociedad, globalización, medio ambiente, economía, etc.), generando una recopilación de documentación que sirva de punto de partida para su estudio [34]. Organizaciones como las Naciones Unidas y la Comisión Europea han desarrollado indicadores compuestos de gran interés [37]–[43].

El creciente número de estas herramientas es un síntoma claro de su importancia política y su relevancia operativa en la toma de decisiones [44].

Para construir un nuevo índice o indicador compuesto son necesarias dos condiciones: (i) conocer qué atributo se quiere analizar y medir, y (ii) disponer de información fiable que permita la medición de dicho atributo [21]. La primera de las condiciones proporcionará al índice un “sustento conceptual” y la validez será otorgada por la segunda condición.

Un requisito adicional para que la construcción de un índice sea robusta es poder definir de forma clara el objetivo por el que se está creando dicho índice.

Según [21], “la característica más relevante que se le puede atribuir a los indicadores compuestos es la de resumir, en un valor, numerosos aspectos que pueden estar interrelacionados. Cuando se pretende utilizar un indicador compuesto, se deben tener presentes las ventajas y desventajas o limitantes que tienen este tipo de indicadores, en particular, buscando reducir las limitantes por medio de una construcción metodológicamente adecuada”.

En la tabla 2.2, se recogen algunas de las ventajas y desventajas de los índices [45].

Tabla 2.2.- Ventajas y desventajas de indicadores compuestos

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede resumir realidades complejas y multidimensionales para ayudar a los que toman la decisión.</li> <li>• Son más fáciles de interpretar que una batería de muchos indicadores por separado.</li> <li>• Pueden evaluar el progreso de los países a lo largo del tiempo.</li> <li>• Reducen el tamaño de indicadores sin dejar caer la información base subyacente.</li> <li>• Permite incluir más información dentro del límite de tamaño existente.</li> <li>• Coloca en el centro de la mira política, las cuestiones de desempeño y progreso del país.</li> <li>• Facilita la comunicación con el público en general (ciudadanos, medios de comunicación...) y promueve responsabilidad.</li> <li>• Permite a los usuarios comparar dimensiones complejas de manera efectiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede mandar mensajes políticos engañosos si se malinterpretan.</li> <li>• Puede invitar a conclusiones políticas simplistas.</li> <li>• Puede ser mal utilizado, por ejemplo, si el proceso de construcción no es transparente y/o carece de estadísticas sólidas.</li> <li>• La selección de indicadores puede ser motivo de disputa política.</li> <li>• Puede ocultar fallos graves en algunas dimensiones y aumentar la dificultad de identificar las medidas correctivas adecuadas, si el proceso de construcción no es transparente.</li> <li>• Puede dar lugar a políticas inapropiadas si las dimensiones de rendimiento difíciles de medir se ignoran.</li> </ul>

## 2.7. INDICADORES AMBIENTALES

### 2.7.1. Introducción

Los proyectos y trabajos actuales para definir y establecer indicadores ambientales surgen de los primeros debates sobre sostenibilidad, popularizados por el “Informe Brundtland” y la “Agenda 21” [46], [47]. En los últimos años, los indicadores ambientales se han convertido en una herramienta fundamental en la evaluación ambiental a nivel detallado, local, regional y nacional [48], influyendo significativamente en la gestión ambiental y la formulación de políticas ambientales [49]. Los indicadores ambientales son importantes porque transmiten un mensaje complejo, potencialmente de numerosas fuentes, de una manera simplificada y útil [50].

En los últimos años, los indicadores ambientales se han convertido en un componente imprescindible de las evaluaciones de impacto e informes sobre el "estado del medio ambiente". Sin embargo, la base científica del proceso de selección de los indicadores utilizados en dichos informes puede mejorarse considerablemente.

En muchos estudios no se mencionan criterios de selección formales, y cuando se utilizan dichos criterios se aplican a los indicadores de forma individual, sin visión global. Como resultado, el proceso de selección de los indicadores está sujeto a decisiones más o menos arbitrarias, encontrando trabajos que tratan de temas similares y utilizan diferentes indicadores [49].

Por tanto, existe una necesidad creciente de establecer indicadores ambientales adecuados basados en información veraz y verificable [51], [52], y cuya definición y desarrollo se ajuste a estándares científicos [48], [53].

### **2.7.2. El concepto de indicador ambiental**

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, un indicador ambiental es un valor observado representativo de un fenómeno en estudio [54]. Los indicadores ambientales cuantifican la información agregando múltiples datos diferentes (necesarios para obtener información fiable); por lo tanto, se pueden utilizar para ilustrar y comunicar fenómenos complejos de una manera más sencilla, incluyendo tendencias y avances durante un cierto período de tiempo [55], [56].

Los indicadores ambientales se utilizan para simplificar el seguimiento de sistemas ecológicos complejos y están compuestos por variables objetivas y cuantificables que informan sobre aspectos específicos del medio, como el número de especies amenazadas o la presencia de contaminantes atmosféricos [1].

Los indicadores ambientales utilizan diferentes fuentes de información para describir el estado de los sistemas biofísicos y los recursos naturales. Actualmente, se consideran indispensables para el diseño de políticas de gestión por parte de las autoridades gubernamentales; ya que permiten explicar la evolución de las condiciones biofísicas a través del tiempo [57].

El inicio del desarrollo de los indicadores ambientales a finales de los años ochenta en Canadá y en algunos países europeos, alcanzando sus mayores impulsos a partir de las diferentes Cumbre de la Tierra celebradas en Estocolmo (1972), Río de Janeiro (1992) y Johannesburgo (2002). En estas cumbres se establecieron recomendaciones de construcción, diseño y uso de los indicadores, con el propósito de medir los avances de la compatibilidad ambiental, social y económica en los países participantes [58].

Numerosos estudios han intentado establecer los criterios fundamentales a la hora de elegir un indicador ambiental, como [20], [50], [59]–[61]. En estas investigaciones, se han identificado hasta 34 criterios diferentes, siendo los más comunes: mensurabilidad, baja demanda de recursos, solidez analítica, relevancia de las políticas y sensibilidad a los cambios dentro de los plazos de las políticas. Un análisis de estos criterios se puede encontrar en [49].

El trabajo actual y futuro sobre indicadores ambientales debe considerar los siguientes aspectos [62]: (i) los indicadores son el producto de numerosos procesos de medición que simplifican en exceso las tendencias ambientales, ignorando importantes factores sociales y políticos producidos por los indicadores; (ii) el establecimiento de nuevos indicadores debe alejarse del desarrollo rápido, ad-hoc y acrítico, para seguir un proceso más cuidadoso donde los indicadores se contextualizan en función de

los factores que los producen a diferentes escalas; y (iii) se debe tener cuidado en la aplicación de indicadores en la gestión y políticas ambientales.

Los indicadores, por tanto, son una necesidad fundamental para la evaluación del desarrollo sostenible [63], utilizándose de forma habitual por instituciones nacionales e internacionales: Naciones Unidas, en su programa para el desarrollo [64], estableció los indicadores de desarrollo sostenible; la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [20] publicó los indicadores ambientales para evaluar el progreso en el ámbito ambiental. También se han desarrollado indicadores para la evaluación estratégica [65], [66], para el impacto social y ambiental [51] y para el planeamiento urbanístico ambiental [67].

Así pues, y siguiendo la teoría de la pirámide de la información [17] (figura 2.3), los indicadores ambientales pueden evaluar los progresos de las políticas ambientales y la efectividad de los programas implementados.



Figura 2.3.- Pirámide de la información

Aunque no existe un procedimiento formal para la construcción y diseño de indicadores ambientales, existen una serie de pasos que son comunes a todas las experiencias seguidas [68]:

- Definir objetivos y metas del sistema de indicadores
- Estructurar analíticamente el sistema y seleccionar los temas
- Revisar la experiencia internacional y nacional al respecto
- Desarrollar la propuesta de indicadores
- Revisar, analizar y evaluar públicamente la propuesta
- Afinarla y probarla

Hay que destacar que la elaboración y diseño de indicadores ambientales debe realizarse teniendo en cuenta los problemas específicos de cada comunidad o territorio en estudio; de lo contrario, se corre el riesgo de desarrollar un conjunto de herramientas de análisis desligado del contexto local [69].

Lo habitual es agrupar los indicadores según el área temática a analizar y teniendo en cuenta los posibles impactos en el medio afectado: agua (consumo y contaminación), atmósfera (contaminación), residuos (producción y disposición), suelo (uso y contaminación) y vegetación (biomasa, diversidad y deterioro), entre otros complementarios de carácter socioeconómico.

Las características más importantes para seleccionar los indicadores ambientales que se van a utilizar son las siguientes [70]:

- Relevantes a escala nacional (pudiendo usarse a escalas regionales locales)
- Pertinentes frente a los objetivos de desarrollo sostenible u otros que se persigan
- Comprensibles, claros, simples y no ambiguos
- Realizables y al menor coste posible
- Limitados en número
- Representativos

Por tanto, se concluye que los indicadores presentan mucha utilidad en las políticas de gestión y toma de decisiones, tanto en el ámbito local como regional y nacional [66], [67]. No obstante, existen dos inconvenientes principales, según [68]:

- Restricciones institucionales: es preciso realizar un gran trabajo para desarrollar metodologías que agrupen temas estadísticos e indicadores, así como un gran conocimiento en la construcción de éstos; los recursos económicos y humanos son limitados; dificultades en la agregación y la comparación de datos; falta de sistemas de compilación de información, etc.
- Restricciones técnicas: falta de capacitación en las metodologías relacionadas con los indicadores de desarrollo sostenible; falta de datos básicos o de estadísticas en términos de calidad y cantidad; diferentes o vagas definiciones que conllevan el riesgo de una mala interpretación; cobertura deficiente de redes de monitoreo; dificultades técnicas y conceptuales de medición, etc.

Estas deficiencias muchas veces no pueden subsanarse, y los indicadores se diseñan a partir de datos que pueden ser recabados, en lugar de los que serían necesarios de acuerdo con su naturaleza [64]. Esto se traduce en la construcción de indicadores según las especificaciones legales, institucionales, sociales y económicas de cada país, región o localidad, resultando que cada uno trabaja con periodos temporales diferentes y a escalas territoriales distintas, midiendo a menudo aspectos irrelevantes y dificultando los ejercicios comparativos [68]. En el ámbito local, es decir, a escala detallada, existe una carencia marcada para el desarrollo de indicadores que permita medir el grado de deterioro de los recursos naturales [71].

### ***2.7.3. Los sistemas de indicadores ambientales***

Existen gran cantidad de sistemas de indicadores ambientales, pero en general se estructuran siguiendo el modelo Presión - Estado - Respuesta (PER) y el modelo Fuerzas motrices - Presión - Estado - Impacto - Respuesta (FPEIR) [30].

El modelo PER (figura 2.4), introducido por la OCDE [11], se fundamenta en la relación causal entre las presiones provocadas por las acciones antrópicas en el medio ambiente y las medidas que se aplican como respuesta al impacto sobre el estado de dicho medio. Las medidas, que pueden ser protectoras o correctoras, tratan de obtener una mejoría del estado ambiental.

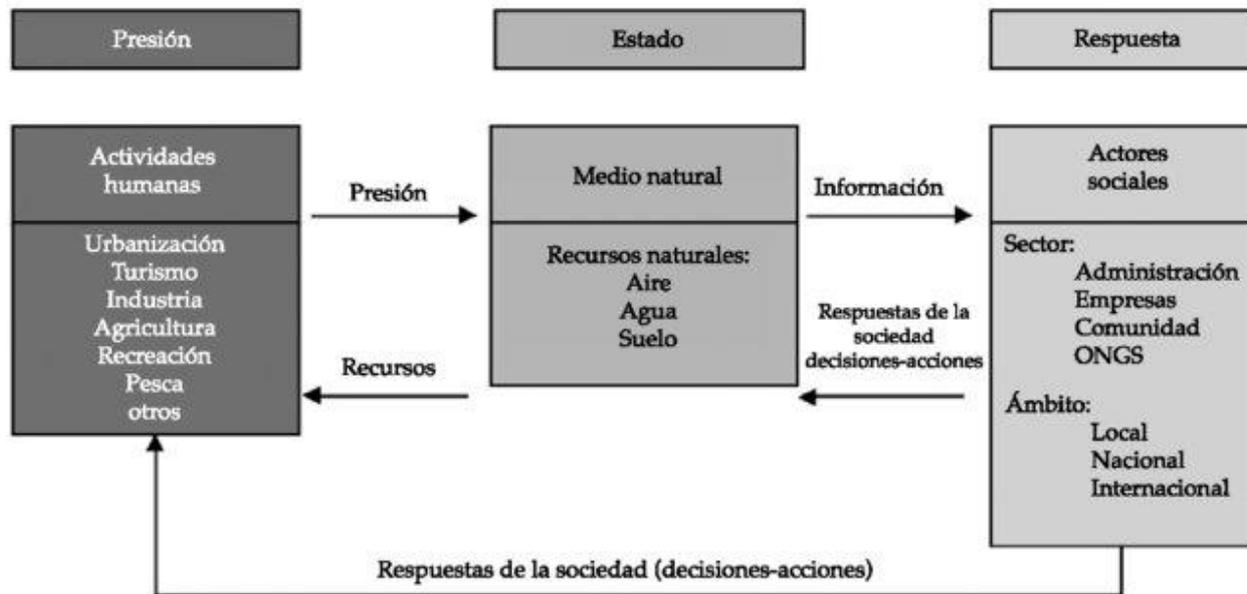


Figura 2.4. Modelo PER

Una variante más compleja de este modelo es el modelo FPEIR (figura 2.5), desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente [72]. Este modelo es un sistema compuesto por los siguientes indicadores:

- Fuerzas motrices: “describen los desarrollos sociales, demográficos y económicos que dan lugar a cambios en los modos de producción y consumo. La tendencia habitual al crecimiento poblacional, económico y del consumo presiona sobre el medio natural”
- Presión: “reflejan las causas de la degradación de la naturaleza como consecuencia de las fuerzas motrices descritas”
- Estado: “describen cómo se encuentran los elementos objeto de evaluación por acción de las presiones que se ejercen”
- Impacto: “describen las modificaciones sobre el medio que producen presiones”
- Respuesta: “reflejan las acciones que se ponen en marcha por parte de determinados colectivos sociales (sobre todo instituciones administrativas) para frenar los problemas ocasionados por las fuerzas motrices, ya sea actuando en los factores de presión o de impacto o sobre el estado a través de la restauración”

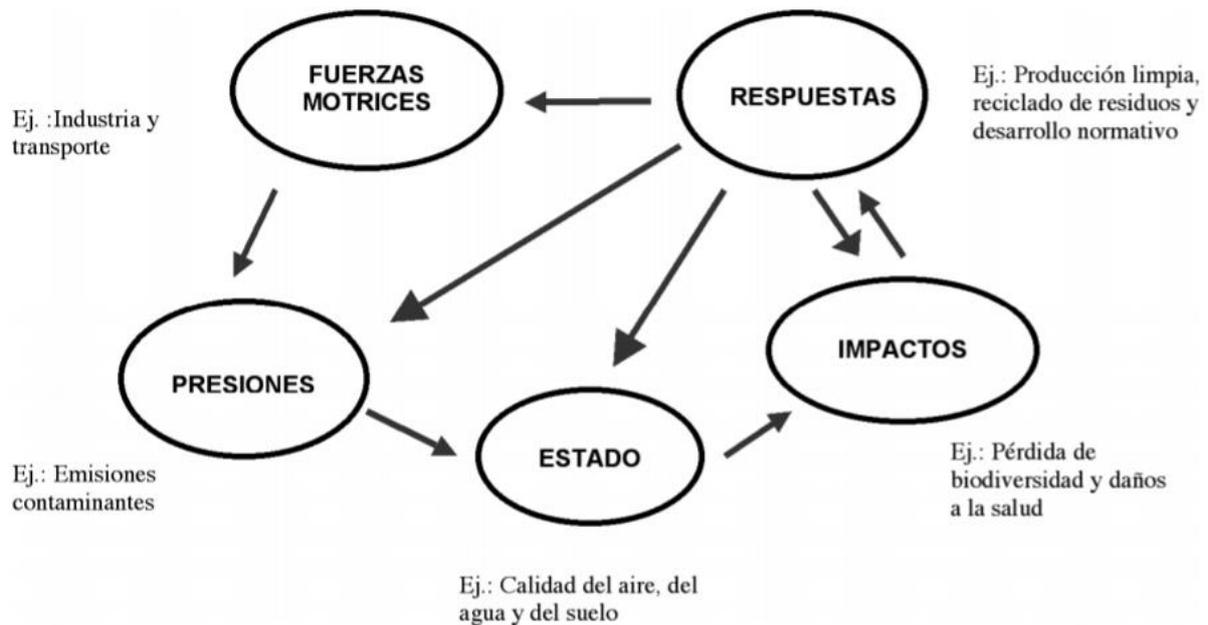


Figura 2.5.- Modelo FPEIR

Este modelo incorpora al modelo PER “las tendencias sectoriales, sociales y económicas ambientalmente relevantes que son responsables de la situación (fuerzas motrices), así como los efectos adversos de los cambios de estado detectados en la salud y comportamiento humanos, el medio ambiente, la economía y la sociedad (impactos)” [70].

Los dos modelos descritos plantean sistemas coherentes de indicadores, que permiten abordar de manera íntegra los problemas ambientales, de forma que estén presentes todos los vínculos y relaciones entre el origen de la problemática y sus consecuencias.

En un sistema de indicadores ambientales, los indicadores deben seguir unos criterios básicos [70]:

- Establecer indicadores sencillos y accesibles a los que no son especialistas
- Que cada indicador constituya una expresión clara de estado y tendencia, generalizable al área temática de referencia
- Que el conjunto de indicadores definidos sea comprensivo de la realidad ambiental referida

Y los objetivos de un sistema de indicadores deben ser los siguientes [70]:

- Facilitar la evaluación del estado ambiental de un territorio o de un problema concreto.
- Proporcionar datos que puedan ser comparados entre diversas regiones, de forma que puedan agruparse para obtener datos globales.
- Proporcionar información sistematizada y de fácil comprensión para el público no experto en la materia sobre la situación ambiental en el ámbito estudiado.

En resumen, los indicadores ambientales deben hacer referencia a problemas ambientales socialmente relevantes, pudiendo ser útiles en los procesos de toma de decisiones y, en general, constituyendo una buena base de consulta, completa y asequible, para un público amplio y no necesariamente experto.

### Indicadores ambientales en Europa

Los primeros trabajos en Europa, realizados por la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas (UNECE) a principios de los años ochenta, finalizaron con una lista de unos 150 indicadores. Estos indicadores estaban fundamentados en información estadística, datos que eran en sí mismos indicadores ambientales. Se escogieron aquellos que podían representar la evolución en el tiempo y, por tanto, tuvieran series de datos lo suficientemente largas y representativas.

Los indicadores se agruparon según Áreas de Interés Ambiental, como se observa en la tabla 2.3 [28]

Tabla 2.3.- Indicadores clasificados en Áreas de Interés Ambiental

<b>Indicadores de Áreas de Interés Ambiental</b>	
Naturaleza	Clima y meteorología Suelo y subsuelo Vida salvaje Vegetación Riesgos naturales
Recursos	Recursos del suelo Recursos energéticos y mineros Agua Bosque y otros recursos forestales
Actividades humanas que afectan al medio	Emisiones de contaminantes al agua, atmósfera y suelo Generación de residuos sólidos y peligrosos Ruido Desarrollo de asentamientos humanos
Calidad del medio, las especies y los hábitats	Calidad atmosférica Calidad del agua Calidad del suelo Calidad del hábitat y las especies Calidad de los asentamientos humanos
Gestión ambiental	

Cada área debía estar cubierta por uno o más indicadores ambientales, sin ser estos excesivos en número. Tampoco había que descartar que un indicador pudiera cubrir dos o más áreas.

En 1991, la OCDE estableció su lista de indicadores, con 48 referencias [11]. Se basó en el modelo PER, identificando conjuntos de indicadores a partir de su relevancia política, su capacidad de análisis y la facilidad para ser medido.

El modelo generado se estructuró en *áreas problema*, que representaban los aspectos del medio ambiente más relevantes que necesitaban disponer de seguimiento (tabla 2.4) [28].

Tabla 2.4.-Indicadores ambientales de la OCDE

<b>Indicadores ambientales OCDE</b>	
Cambio climático	Índice de emisiones de gases de efecto invernadero Concentración atmosférica de gases de efecto invernadero Temperatura media mundial Eficiencia energética
Destrucción de la capa de ozono	Índice de consumo de sustancias destructoras de la capa de ozono Concentración en la atmósfera de sustancias destructoras de la capa de ozono Radiación UV a nivel del suelo Tasa de recuperación de CFCs
Eutrofización	Emisiones de N y P al agua y suelo Concentración de N y P en aguas continentales y marinas Porcentaje de población conectada a sistemas de depuración
Acidificación	Índice de sustancias acidificantes Superación de la carga crítica potencial de ácido en suelo y agua Tasa de automóviles con convertidor catalítico Capacidad de depuración de SOX y NOX en fuentes estacionarias
Contaminación tóxica	Emisión de metales pesados Emisión de compuestos orgánicos Concentración de metales pesados y compuestos orgánicos en el medio Cambios en el contenido tóxico de productos y en procesos de producción
Medio ambiente urbano	Emisiones urbanas de SOx, NOx y COV Exposición de la población a contaminación atmosférica y ruido Condiciones del agua en áreas urbanas
Biodiversidad	Alteración del hábitat y transformación del suelo Tasa de especies amenazadas y extintas sobre el total Área protegida sobre el total del área de cada ecosistema
Residuos	Producción de residuos urbanos, industriales, nucleares y peligrosos. Esfuerzos en minimización de residuos
Recursos hídricos	Consumo de agua Frecuencia, duración y extensión de las restricciones de agua Precio del agua y carga a los usuarios del tratamiento de aguas residuales como porcentaje del coste
Recursos forestales	Producción sostenida de las cosechas a corto plazo/explotación actual Área/volumen y distribución de bosques
Recursos piscícolas	Capturas Tamaño de las existencias en puestas
Degradación de suelos	Riesgo de erosión: uso actual y potencial del suelo para agricultura Grado de pérdida de suelo Áreas recuperadas
Degradación de suelos	Riesgo de erosión: uso actual y potencial del suelo para agricultura Grado de pérdida de suelo Áreas recuperadas

Otros organismos, como la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) o la Oficina Estadística de la Unión Europea (EUROSTAT), han publicado también sus propias listas (tabla 2.5) [72].

Tabla 2.5.- Indicadores ambientales de la AEMA

<b>Indicadores ambientales - Agencia Europea del Medio Ambiente</b>	
Desarrollo social y presiones	Evolución de la población total en el territorio de la UE Evolución de la población rural y urbana en el territorio de la UE Evolución del PIB en los 18 países de la AEMA Evolución de la producción industrial Evolución de industrias seleccionadas Tendencia en la utilización intensiva de materiales y energía Emisiones a la atmósfera procedentes de la industria Emisiones al agua procedentes de la industria Evolución del consumo de energía Evolución del consumo de energía por sectores industriales Tendencias en el PIB, consumo per cápita de energía y electricidad Emisiones a la atmósfera procedentes del sector energético Evolución del transporte de pasajeros Evolución del transporte de mercancías Transporte de pasajeros por avión Emisiones a la atmósfera procedentes del sector del transporte Índices de producción agrícola Evolución del número de industrias ganaderas Desarrollo de indicadores de presión en la agricultura Evolución del uso del suelo Evolución de la superficie construida Evolución del consumo doméstico Porcentaje del gasto doméstico en actividades seleccionadas Evolución del promedio del tamaño de la vivienda Evolución del número de coches por 1.000 habitantes Evolución de las llegadas de turismo internacional
Cambio climático	Emisiones de CO <sub>2</sub> Emisiones de metano Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de fuente
Disminución de la capa de ozono	Evolución del consumo de CFCs y halones
Acidificación	Emisiones de SO <sub>2</sub> Emisiones de NO <sub>x</sub> Emisiones de NH <sub>3</sub> Fuentes de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y NH <sub>3</sub> Niveles de deposición de sustancias acidificantes Niveles de superación de valores críticos Efectos de la acidificación en lagos Acidificación en los bosques: daños forestales (defoliación) Efectos de la acidificación en suelos y materiales
Ozono troposférico	Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) Fuentes de emisión de COVs Mapa de superación del valor umbral de protección de la población Niveles de concentración de ozono Efectos del ozono en la salud

Calidad del aire urbano	<p>Niveles de emisión de contaminantes</p> <p>Niveles de emisión de plomo</p> <p>Niveles de inmisión de contaminantes</p> <p>Niveles de inmisión de plomo</p> <p>Condiciones de salud relacionadas con la calidad del aire urbano</p> <p>Evolución del consumo de combustible con/sin plomo</p> <p>Evolución del parque de vehículos con catalizador</p>
Gestión de residuos	<p>Generación de residuos por fuente: municipal, industrial, agrícola, energética, etc.</p> <p>Evolución de la generación de residuos municipales</p> <p>Tratamiento de residuos municipales</p> <p>Evolución de la generación de residuos peligrosos</p> <p>Porcentaje de reciclado de papel y vidrio</p>
Calidad de aguas continentales	<p>Disponibilidad de los recursos hídricos</p> <p>Niveles del consumo de agua por sectores</p> <p>Consumo de agua para abastecimiento municipal o público</p> <p>Zonas con sequía (deficiencia de agua)</p> <p>Consumo de fertilizantes</p> <p>Consumo de pesticidas</p> <p>Concentración de nitratos en las aguas subterráneas</p> <p>Concentración de pesticidas en las aguas subterráneas</p> <p>Evolución de las fuentes puntuales de emisión entre 1980 y 1990</p> <p>Evolución del consumo de fertilizantes</p> <p>Reparto de los tipos de fuentes: nutrientes, materia orgánica y metales pesados</p> <p>Calidad de las aguas de los ríos</p> <p>Calidad de las aguas en lagos y embalses</p> <p>Evolución del tratamiento de las aguas residuales</p> <p>Evolución del consumo de detergentes libres de fosfatos</p> <p>Evolución de los vertidos de fósforo por las industrias</p>
Litoral y aguas marinas	<p>Evolución del vertido de nutrientes a los mares europeos</p> <p>Fuentes de aporte de nutrientes</p> <p>Concentración de nutrientes en los mares europeos</p> <p>Mapas con zonas de elevada eutrofización</p> <p>Tratamiento de las aguas residuales</p> <p>Tendencias en el vertido de sustancias contaminantes en los mares europeos</p> <p>Concentración de contaminantes: metales y contaminantes orgánicos</p> <p>Niveles de concentración de contaminantes en organismos</p> <p>Contaminación por hidrocarburos</p>
Naturaleza y biodiversidad	<p>Grado de amenaza de las especies silvestres</p> <p>Análisis de los principales ecosistemas y hábitats naturales</p>

La tendencia muestra una distribución piramidal de datos ambientales [73], con un vértice superior que contiene los indicadores más importantes y menores en número (llamados *titulares*, de forma similar a la estructura periodística); una zona media con los Sistemas de Indicadores; y una base más amplia, por debajo de la anterior, que contiene los datos básicos (figura 2.6).

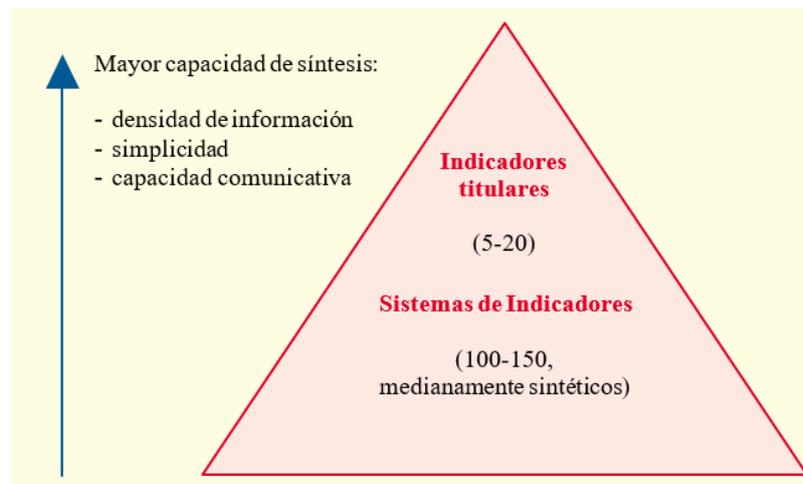


Figura 2.6.- Jerarquía de la información ambiental

Actualmente, se debate acerca de si es necesario disponer de indicadores simplificados y con capacidad de síntesis en la zona superior de la pirámide o, por el contrario, cubrir todos los problemas medioambientales con un conjunto mucho más amplio.

La Agencia Europea de Medio Ambiente aboga por disponer de un pequeño conjunto de indicadores físicos (no basados en la economía) que muestre los avances conseguidos en la política ambiental [73]. Esta premisa también fue la base de un estudio realizado en los Países Bajos [74].

Para establecer un Sistema de Indicadores Ambientales hay que tener claro que hay que diferenciar entre ser selectivos y sintéticos, para que así los informes que se realicen sean de fácil entendimiento para la población, aunque esto conlleva a veces que solo se traten los temas más actuales; otra opción, es la de utilizar sistemas con más amplitud, que integren muchas más posibilidades, ya sean actuales y relevantes o con menor importancia, siendo esto un problema ya que se pueden generar listados de indicadores no tan fáciles de comprender y poner en marcha.

Hay que tener en cuenta que es difícil conseguir un sistema que cubra todos los objetivos. Siendo prácticos, se selecciona un Sistema de Indicadores en concreto y se escogen aquellos indicadores que se adapten mejor al informe que se tenga que realizar.

Hay una serie de indicadores que se pueden aplicar de manera general en Europa, y de forma más concreta e importante a nivel internacional y nacional. Según la Agencia de Medio Ambiente [72], se recomienda que se haga una selección de indicadores que permitan determinar de mejor forma la situación del territorio a estudiar a nivel ambiental.

### Indicadores ambientales en España

El Ministerio de Medio Ambiente, basándose en el modelo PER, elaboró el Sistema Español de Indicadores Ambientales [28], compuesto por 79 indicadores distribuidos en 9 áreas y 18 temas ambientales (tabla 2.6).

Tabla 2.6.- Sistema Español de Indicadores Ambientales

<b>Sistema Español de Indicadores Ambientales</b>		
<b>Áreas</b>	<b>Temas ambientales</b>	<b>Indicadores (selección)</b>
Atmósfera	Destrucción de la capa de ozono	Espesor de la capa de ozono
	Calentamiento global	Emisiones de CO <sub>2</sub>
	Acidificación	Emisiones de SO <sub>2</sub>
	Contaminación fotoquímica	Inmisiones de NO <sub>2</sub> en medio urbano
Residuos	Eliminación de residuos	Producción neta de residuos tóxicos y peligrosos Volumen de fangos generados en depuradoras
Medio urbano	Contaminación atmosférica Deterioro urbanístico	Inmisiones de SO <sub>2</sub> respecto a valores legislados % de población con ordenanzas de ruido Superficie de zonas verdes por habitantes
Biodiversidad	Pérdida de especies y ecosistemas	Especies vulnerables y en peligro de extinción Índice de intensificación agrícola
Bosques	Calidad y extensión del bosque	Tasa de variación de la masa forestal
Costas	Cambio en los usos del medio Contaminación	% de superficie de la costa ocupada por construcciones
Medio marino	Sobreexplotación Contaminación	Capacidad de pesca en aguas jurisdiccionales
Suelo	Pérdida de suelo	Replantación hidrológico-forestal
Agua	Calidad del agua Cantidad de agua	Longitud de río con calidad de agua mala Sobreexplotación de acuíferos

## 2.8. ÍNDICES AMBIENTALES

La mayoría de índices ambientales se ha desarrollado para indicar la condición ambiental de un país y los progresos de las políticas y estrategias emprendidas por diversas partes interesadas para mejorar el estado ambiental. En general, el objetivo de un índice ambiental es encontrar una medida compuesta que combine todos los indicadores identificados para reflejar el estado progreso ambiental actual o la distancia a la cual se encuentran las metas ambientales cuantificables propuestas [75].

La mayoría de los indicadores ambientales compuestos miden conceptos multidimensionales sobre un grupo de países para su posterior comparación entre ellos (rankings), siendo difícil encontrar índices ambientales en escalas más pequeñas. Algunos de los indicadores compuestos o índices ambientales más conocidos son: Índice de Desempeño Ambiental (*Environmental Performance Index - EPI*) [52], [76], el Índice de Vulnerabilidad Ambiental (*Environmental Vulnerability Index*) [77], el Índice Planeta Vivo (*Living Planet Index*) [78] y la Huella Ecológica [79].

Los países se clasifican con respecto a los valores de un índice calculado. Las clasificaciones son sensibles a cambios metodológicos minuciosos y, por lo tanto, tienen características subjetivas inherentes [76]. Se han suscitado muchos debates cuando se ha reducido el rango de un país. Cabe señalar que la construcción de un índice ambiental significativo y sólido es el área de enfoque y no los rangos. Además, los índices difieren considerablemente y ofrecen resultados que conducen a conclusiones diferentes sin ofrecer una asistencia eficaz en la formación de asesoramiento sobre políticas [75].

Las diferencias observadas en los índices ambientales se deben principalmente a las distintas formas de construcción del índice compuesto: selección de indicadores y/o variables, escala de los indicadores elegidos y método de combinación de los indicadores para formar el índice. Se ha observado que no existen reglas inequívocas para la selección de indicadores, la normalización, la ponderación y los métodos de combinación [75].

Se puede concluir diciendo que los índices ambientales se han desarrollado para diferentes propósitos y, por lo tanto, difieren en número y tipo de indicadores.

### **3. USO DEL SUELO. PROYECTO SIOSE**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

##### **3.1.1. Descripción de las técnicas de cartografía con GIS**

La cartografía de la ocupación del suelo es una cartografía temática que representa dos componentes distintas pero interrelacionadas: la ocupación de la superficie del suelo según sus propiedades biofísicas, llamada cubierta terrestre, y la caracterización del territorio según su dedicación socioeconómica, llamada uso del suelo. Por lo tanto, la cartografía de los usos y coberturas del suelo implica factores naturales y socioeconómicos utilizados en un espacio y un tiempo determinados [80]. Su principal objetivo es la planificación y la supervisión de recursos, como los cambios que afectan a la cubierta natural causados por el uso del suelo. Este proceso es generalmente impulsado por los fenómenos y actividades antropogénicas, que afectan al ecosistema natural.

Los sistemas de información geográfica (GIS, con las siglas en inglés) son instrumentos útiles para la elaboración de mapas de usos y cobertura del suelo. Ofrecen una importante ventaja al integrar diferentes tecnologías de la información como la teledetección (RS) y los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). Esta integración permite un análisis más eficiente de los cambios y la cuantificación de la dinámica del uso del suelo [81]. El Instituto Geográfico Nacional de España (IGN) coordina, en paralelo, dos proyectos destinados a estructurar información sobre el uso y la cobertura del suelo: Corine Land Cover y SIOSE.

##### **3.1.2. Corine Land Cover**

El proyecto Corine Land Cover, establecido por la Unión Europea y coordinado por la Agencia Europea del Medio Ambiente, tiene por objeto homogeneizar la información sobre toda Europa, para facilitar la realización de análisis territoriales, el estado del medio ambiente y los recursos naturales, y el establecimiento de políticas europeas.

Esta información, integrada en un sistema internacional de información geográfica, se estructura como un modelo de datos jerárquico de 44 clases en el nivel 3 y 58 clases en el nivel 4. Se define en un 1:100.000 escala espacial y tiene una superficie poligonal mínima de 25 hectáreas. El primer producto se obtuvo en 1990 y se han hecho actualizaciones posteriores en 2000, 2006, 2012 y 2018 [82], [83].

##### **3.1.3. SIOSE**

La necesidad de información más detallada sobre el uso del suelo a escala nacional condujo al desarrollo del Sistema de Información sobre la Ocupación del Territorio Español (SIOSE) en 2005. Este sistema se ha estructurado como un modelo de datos conceptuales orientado al objeto, con 40 clases simples y 46 clases compuestas; su escala es de 1:25.000. Su unidad de trabajo es el polígono, con una superficie mínima mapeable de 2 hectáreas para áreas agrícolas, forestales y naturales; 1 ha para zonas urbanas y cuerpos de agua; y 0,5 hectáreas para cultivos. El modelo conceptual incluye dos superclases: el uso del suelo y la cobertura. La cobertura puede ser de un tipo simple cuando es único

dentro del polígono, o compuesto cuando el polígono incluye dos o más tipos de cobertura simple o compuesta a su vez. Sin embargo, el uso del suelo se refiere al tipo de actividad socioeconómica y no corresponde necesariamente a un aspecto físico. Por ejemplo, una cobertura forestal puede tener un tipo de uso más recreativo y/o económico[83]. De esta manera, el modelo SIOSE no describe una única cobertura para cada polígono, pero puede asignar una o varias coberturas simples o compuestas para un solo polígono a través de sus atributos y porcentajes de ocupación. En consecuencia, SIOSE ofrece información temática más detallada orientada a las necesidades de los usuarios [82] (figura 3.1).

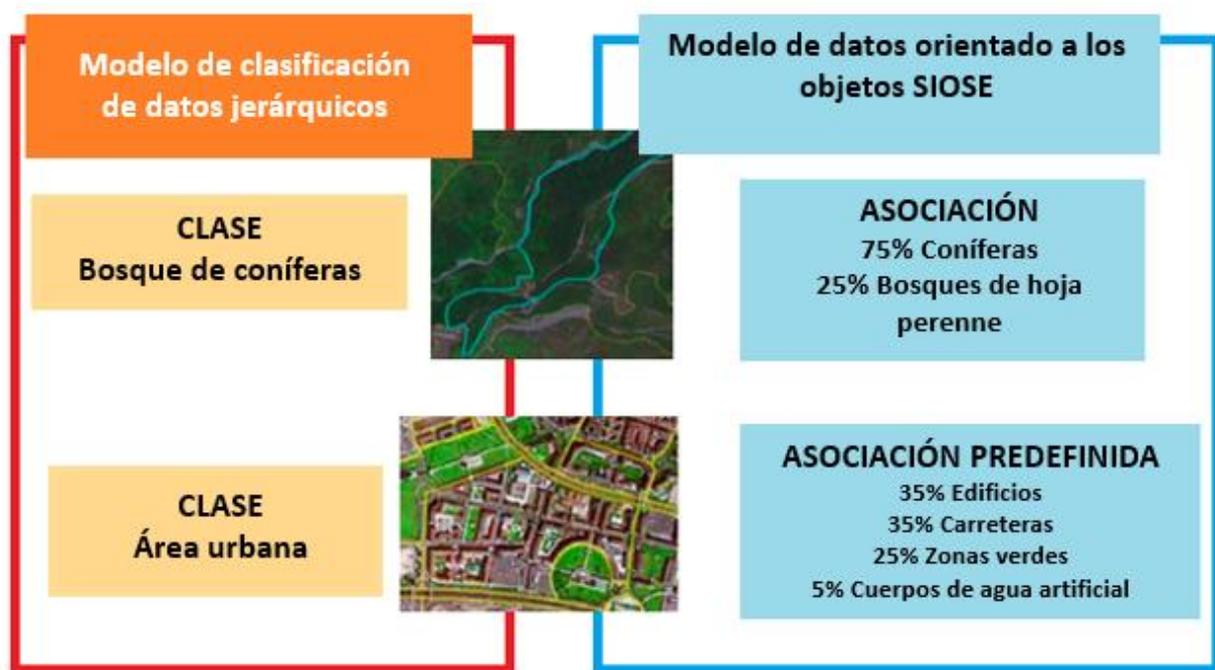


Figura 3.1.- Ejemplo de clasificación utilizando un sistema de modelación jerárquica de datos y el Sistema de Información de Ocupación (SIOSE)

El proyecto SIOSE se desarrollará de forma más amplia en un apartado posterior de este capítulo.

### 3.2. LA OCUPACIÓN DEL SUELO

Para poder establecer políticas medioambientales apropiadas, realizar estudios socioeconómicos precisos, efectuar evaluaciones de impacto ambiental o que consistan en ordenar el territorio, es inevitable tener información objetiva, precisa, armonizada y actualizada sobre el territorio que nos rodea.

A lo largo de los años, gracias al desarrollo de la teledetección y al procesamiento digital de las imágenes, la captura y actualización de este tipo de información geográfica es hoy en día mucho más sencilla, rápida y eficaz, obteniéndose cartografía y bases de datos de ocupación del suelo de prácticamente toda la superficie terrestre.

La ocupación del suelo estudia las cualidades de la superficie terrestre desde dos puntos de vista diferentes, pero relacionados entre sí:

- La **cobertura del suelo** (*Land Cover*, LC) o categorización de la superficie terrestre en diferentes secciones según sus cualidades biofísicas, como, por ejemplo, superficie urbana, cultivo, arbolado forestal, etc.
- El **uso del suelo** (*Land Use*, LU) o caracterización del territorio conforme a su dimensión funcional o su dedicación socioeconómica actual, como por ejemplo uso industrial, comercial, recreativo, etc.

De manera que los dos conceptos no son independientes entre sí. La cobertura del suelo afecta en las actividades que ejercen los seres humanos en esa zona del territorio y las modificaciones en los usos del suelo afectan, en mayor o menor medida, a la modificación y transformación de la cubierta terrestre.

Por tanto, el ser humano debe comprender el espacio en el que vive y actuar de acuerdo con su realidad. Por ello, desde fines del siglo pasado, el número de estudios sobre ocupación de suelo ha aumentado sustancialmente, utilizando métodos de tecnología espacial, imágenes de satélite, fotografías aéreas y sistemas de información geográfica para generar bases de datos de ocupación de suelo, entre otras aplicaciones, para mejorar el entorno de vida y planificar y gestionar de forma sostenible.

En España, la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) ocupa el cargo de Centro Nacional de Referencia en Ocupación del Suelo, apoyándose en el Punto Focal Nacional, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marítimo, y la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Uno de sus principales objetivos es coordinar la información de uso del suelo en nuestro país, utilizando el soporte de transmisión de información proporcionado por la red EIONET (Red de Observación e Información Ambiental) de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA).

Como centro de referencia nacional, el IGN y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) participaron por primera vez en el proyecto europeo de ocupación del suelo denominado Corine Land Cover 90 en 1990, que se llevó a cabo en el marco de CORINE (Coordinación de Información Ambiental). El objetivo del proyecto es crear una base de datos geográfica de uso y cobertura del suelo, y utilizar una nomenclatura única para toda Europa, como herramienta clave para gestionar las políticas europeas relacionadas con el territorio, la agricultura, el medio ambiente y los recursos naturales, entre otros. El éxito de la base de datos permitió actualizarla en 2000 a través de un proyecto llamado IMAGE & Corine Land Cover 2000, que no solo proporcionó datos de uso del suelo para el año en curso, sino que también permitió tener una cobertura de suelo entre los años 1990 y 2000.

En España, estos proyectos han sido y están siendo dirigidos y coordinados conjuntamente por el IGN/CNIG, y se llevan a cabo en colaboración con las Comunidades Autónomas (CCAA) y la Administración General del Estado (AGE), todos ellos implicados en los procesos de producción, control y gestión. Sin embargo, a causa de la producción de IMAGE & Corine Land Cover 2000 y debido a las características del proyecto, la escala de 1:100.000 y su modelo de datos jerárquico no pueden satisfacer las necesidades de la AGE y de las comunidades autónomas, ya que estas cuentan con bases de datos más exactas y precisas, pero debido a su distinta nomenclatura, no se pueden comparar entre sí. Por ello, España se comprometió a actualizar el modelo de datos de la base de datos

de ocupación del suelo español en una mayor resolución y de forma más precisa para integrar la información y las nomenclaturas que ya existían en el país.

Para ello, España puso en marcha en 2005 un proyecto denominado SIOSE (Sistema Español de Información de Ocupación de Suelo en España) [84]. El proyecto se basa en la metodología Corine Land Cover y la Directiva INSPIRE de la Unión Europea (UE), integrando y coordinando la base de datos de ocupación de suelo de la comunidad autónoma y la AGE, y se lleva a cabo con el objetivo de convertirse en un referente ambiental para las medidas políticas y la investigación ambiental en nuestro país.

### 3.3. PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN DE OCUPACIÓN DEL SUELO EN ESPAÑA (SIOSE)

El Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, más comúnmente conocido como SIOSE, se incorporó al Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) con la intención de conseguir una amplia base de datos de ocupación del suelo para todo el país, con una escala de referencia 1:25.000 y aportando tanto información de las Comunidades Autónomas como de la Administración General del Estado. Toda esta información se actualiza de forma periódica (figura 3.2).



Figura 3.2.- Actualización del SIOSE

Los principales objetivos de SIOSE son:

- Satisfacer las necesidades y los requerimientos de la Unión Europea, la Administración General del Estado y las comunidades autónomas en materia de ocupación del suelo
- Integrar o recoger la información de las bases de datos de ocupación del suelo de la Administración General del Estado y de las comunidades autónomas
- Hacer partícipes a las comunidades autónomas en el nivel de producción, control y gestión del SIOSE
- Evitar las duplicidades y reducir costes en la generación de la información geográfica

Además, se establecen como puntos importantes:

- Definir metodologías consensuadas y armonizadas
- Repartir costos e incrementar beneficios
- Satisfacer las necesidades en datos, servicios y conocimiento del Programa Copernicus en materia de ocupación del suelo
- Mantener activa la participación de los expertos en ocupación del suelo en la implementación de la Directiva INSPIRE 2007/2/CE
- Integrar y cooperar en políticas europeas y mundiales
- Incrementar la convergencia y cohesión en Europa

Para asegurarse de que todos, tanto comunidades autónomas como la administración sigan las mismas reglas técnicas, se instauran una serie de especificaciones, siendo estas:

- **Sistema Geodésico de Referencia:** *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*, según las recomendaciones dictadas por el Consejo Superior Geográfico y atendiendo a los requisitos establecidos por la Directiva europea INSPIRE (2007/2/CE).
- **Sistema Cartográfico de representación:** Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) en el huso mayoritario de la comunidad autónoma.
- **Escala de referencia:** 1:25.000, con una precisión planimétrica final de al menos 5 m.
- **La Unidad espacial** es el polígono. SIOSE divide geoméricamente todo el territorio según una malla continua de polígonos, donde cada polígono tiene asignado un tipo de cobertura o una combinación de ellas (figura 3.3)
- **La superficie mínima** que representa un polígono SIOSE depende de la cobertura del suelo de este (versiones 2005-2015 con ligeras variaciones):
  - Agua, cultivos forzados, coberturas húmedas, playas, vegetación de ribera y acantilados marinos: 0,5 ha.
  - Zonas urbanas: 1 ha
  - Zonas agrícolas, forestales y naturales: 2 ha

El SIOSE utiliza herramientas GIS secundadas por ordenador para la foteointerpretación. El Núcleo Español de Metadatos (NEM) proporciona las especificaciones para el perfil de metadatos, y así de manera más amplia también las recomendaciones y directrices que marca el Consejo Superior Geográfico y la Norma Internacional ISO 19115:2003.

Los productos básicos que se generan con este proyecto son:

- Imágenes ortorrectificadas por escenas (Spot P y XS)
- Imágenes de fusión (Pan +XS) por escenas
- Base de datos SIOSE por hojas 1:25.000
- Base de Datos SIOSE por CCAA
- Base de Datos SIOSE unida para toda España
- Metadatos nacionales
- Metadatos autonómicos
- Metadatos por hojas del MTN25



*Figura 3.3.- Polígonos SIOSE*

### Organización del proyecto

Para la creación del SIOSE se recurre a la participación de muchas entidades: la AGE mediante los Ministerios de Fomento, Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Economía y Hacienda, Defensa, Vivienda y Ciencia e Innovación, también las 17 CCAA y Ceuta y Melilla. Cada uno de ellos participan en la producción y financiación del SIOSE (figura 3.4).

El Área de Fotogrametría y Teledetección del IGN/CNIG es la responsable de la dirección nacional del proyecto, encargándose de:

- La gestión del proyecto: control del presupuesto, calendarios de actividades, comunicación con las diferentes organizaciones españolas y europeas, etc.
- La dirección del proyecto en las diferentes CCAA compartida con las autoridades autonómicas.
- El control de calidad y evaluación de las bases de datos
- La integración de los datos de los diferentes equipos autonómicos
- Los metadatos a nivel nacional
- El intercambio de datos con la Unión Europea, la AGE y las CCAA

Por su parte, los 19 equipos autonómicos de producción, con un Coordinador para cada Comunidad Autónoma, se encargan de:

- La producción de la base de datos de ocupación del suelo de su Comunidad Autónoma
- Verificación de la base de datos autonómica
- La producción de los metadatos a nivel autonómico

El Equipo técnico Nacional tiene como objetivo seguir y controlar cómo va el proyecto, y está formado por 7 miembros de la AGE y 4 de las CCAA.

Para poner en marcha el proyecto, se realizaron asambleas y reuniones, para así poder determinar las acciones más importantes a llevar a cabo.

Los grupos se formaron con representantes de las Administraciones Públicas, así como de otras organizaciones de interés y llevaron a cabo el análisis de la información en materia de ocupación del suelo, tanto a nivel nacional como regional. También se consensaron los criterios de fotointerpretación y los procesos metodológicos a seguir, determinando procesos como: producción, control de calidad, formatos, productos, metadatos a generar, los criterios sobre la propiedad de los datos, distribución y diseminación de estos, etc.

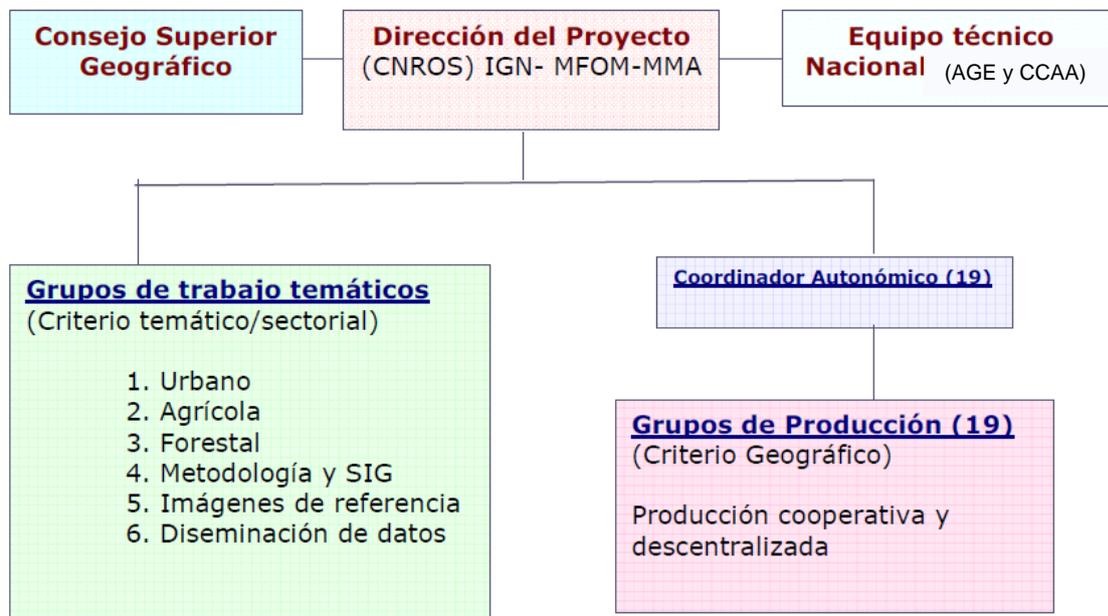


Figura 3.4.- Esquema general de la organización del proyecto [83]

### Metodología [84]

El SIOSE parte de imágenes de satélite SPOT5 P+XS (imagen de fusión de la imagen pancromática y la multispectral) del año 2005 para todo el país con resolución espacial de 2,5 m que se corrigen de forma automática.

Las imágenes anteriormente mencionadas, con resoluciones espaciales medias y altas, proporcionan información y son la base para la ejecución del proyecto y resultan del Protocolo firmado el 18 de octubre de 2005, entre los Ministerios de Defensa, Fomento y Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Con ellas se consigue la cobertura del territorio español, y permitió la firma de un Convenio entre los Ministerios de Fomento y Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, con el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial del Ministerio de Defensa (INTA).

Para secundar la información se utilizan 2 coberturas de imágenes Landsat 5, en primavera y verano y también las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con un tamaño de píxel menos o igual a 1m.

Además, el proyecto hace uso de otra información vectorial disponible como es:

- La base de datos BCN25 del IGN.
- La cartografía catastral de la Dirección General del Catastro del Ministerio de Economía y Hacienda.
- El Mapa de Cultivos y Aprovechamientos y el Mapa Forestal de España, ambos del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- El Mapa Geológico de las Islas Canarias del Instituto Geológico y Minero de España.

Para que se integre de manera geométrica en la base de datos del SIOSE, la información tiene que cumplir con las características definidas por el proyecto.

A partir de la información disponible, el terreno se digitaliza y fotointerpreta, lo que conlleva a que después se haga una comprobación in situ en el sitio que ayuda a resolver posibles dudas de la fotointerpretación a través de tomar fotos de campo digitales georreferenciadas con GPS.

Una vez realizados los trabajos, el equipo de producción de las CCAA se encarga de asegurarse que la base de datos generada cumple las especificaciones geométricas, topológicas y temáticas que se establecieron en el proyecto, y el Equipo Técnico Nacional lo supervisa, así si se ha cometido algún error se puede corregir.

Cuando las bases autonómicas de datos del SIOSE acaban y se validan, se integran y así se consigue una base de datos continua para todo el territorio.

### Proyecto SIOSE Alta Resolución (SIOSE AR)

A partir de añadir fuentes geoespaciales de alto detalle se crea el SIOSE de Alta Resolución, cuyo objetivo principal es integrar, armonizar y homogeneizar dichas fuentes comentadas anteriormente, para así conseguir un resultado pionero en el campo de la ocupación del suelo en España.

Entre sus principales características podrían destacarse:

- Esquema productivo cooperativo entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas
- Alto nivel de automatización en la Integración de fuentes de referencia, lo que posibilita una objetividad, reducción de costes, mayor frecuencia de actualización y mantenimiento de geometrías y temáticas responsables.
- Continuación de la filosofía de un modelo de datos orientado a objetos como el SIOSE tradicional o el modelo de datos europeo Copernicus EAGLE.
- Máxima resolución posible desde las fuentes de referencia (por ejemplo, escalas 1:1.000-1:5.000)

### Aplicaciones medioambientales

Como bien se sabe, España es una península y está rodeada en un 88% de agua. Prácticamente la mitad del territorio son zonas agrícolas o de labor en secano, menos de la mitad son zonas forestales y terrenos sin vegetación. Las superficies artificiales y coberturas de agua ocupan menos de una décima parte.

Para poder llevar a cabo medidas medioambientales en nuestro país, es necesario conocer de manera exhaustiva qué tipos de coberturas existen, así como los usos del suelo y como han evolucionado a lo largo del paso del tiempo. Con todo, se podrá desarrollar el sistema tanto económica como socialmente.

La Base de Datos SIOSE dispone de muchas aplicaciones, ya que se le puede almacenar una gran cantidad de información aparte de en forma de cobertura o atributos. Entre las aplicaciones, destacan las siguientes:

- Estudios de ordenación del territorio o desarrollo sostenible
- Evaluaciones de impacto ambiental
- Cambio climático
- Estrategias de gestión de zonas costeras
- Causas y consecuencias de procesos naturales o artificiales
- Estudio de la superficie ocupada por los glaciares y las nieves permanentes
- Estudios sobre el tipo de agricultura en nuestro país
- Superficie urbanizada

A raíz de los muchos cambios que la sociedad hace constantemente, se plantea el querer saber cómo es el entorno que nos rodea, y por eso se ha demostrado que los indicadores ambientales nos ayudan a poder comprender cómo se encuentra el medio ambiente que nos rodea. A partir de la base de datos del SIOSE se pueden obtener indicadores de ocupación de suelo como los que se citan a continuación:

- Superficie de cultivos anuales y permanentes
- Costa desnaturalizada
- Evolución de la superficie dedicada a invernaderos
- Superficie urbanizada
- Superficie forestal
- Superficie urbanizada en el litoral
- Superficie afectada por desertificación
- Superficie de suelo afectada por erosión
- Incendios forestales
- Tasa de suelo agrícola de regadío



## 4. ÍNDICE WEI (WEIGHTED ENVIRONMENTAL INDEX)

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Los índices e indicadores ambientales basados en el análisis del uso y de la cobertura del suelo con GIS (Sistemas de Información Geográfica, con siglas en inglés) suelen basarse en valores cualitativos de diferentes parámetros asignados a las distintas parcelas en que se ha dividido la zona de estudio [80], [85]–[87]. En estas situaciones, el número de categorías del suelo suele ser reducido (entre cinco y once) y es fácil hacer comparaciones entre los mapas correspondientes de diferentes años. Sin embargo, estos índices no permiten realizar evaluaciones cuantitativas de los cambios de la calidad del medio ambiente, más allá del análisis de los usos del suelo por unidad de superficie.

Los índices ambientales más elaborados cuantifican el valor ambiental basado en los cambios de uso del suelo. Este es el caso de [88], que estudia la variación del grado de antropización mediante el análisis de un único factor denominado Índice de Antropización Integrada Relativa (INRA). Este índice incluye cinco categorías diferentes de antropización del suelo, con valores relativos que varían entre 0 y 1. En estudios posteriores se ha modificado el índice INRA para incluir más categorías, como en [89], donde añaden 27 subcategorías adicionales, proporcionando un mayor grado de detalle en la definición del índice INRA. El valor relativo de antropización asignado a cada una de estas nuevas categorías se obtiene como resultado de la aplicación de un análisis de decisión multicriterio, basado en el juicio de expertos.

Estudios recientes se centran en la aplicación de metodologías de lógica difusa para la evaluación del uso del suelo. La evaluación de la idoneidad general de las unidades terrestres se basa en la definición de factores de ponderación de las características pertinentes. En estas metodologías, la elección de los valores de peso es de importancia crítica y se deciden, normalmente, sobre la base del conocimiento experto, considerando asesoramiento local, datos experimentales o métodos previos de evaluación de la tierra [90].

En este trabajo se aplicará el índice WEI (*Weighted Environmental Index*) [91], desarrollado por investigadores de la Universitat Politècnica de València. Este índice ambiental está basado en técnicas de análisis del uso del suelo y permite que toda la información obtenida de bases de datos oficiales y públicas se integre en una escala detallada.

### 4.2. DESCRIPCIÓN DEL WEI. ESQUEMA CONCEPTUAL

El índice ambiental WEI es un nuevo índice con el que poder analizar el valor ambiental de un territorio basándose en el uso del suelo.

Este índice ha sido definido para cumplir con las siguientes características:

1. Debe integrar todas las características de los índices que varían continuamente en el espacio.
2. Sus valores deben justificarse de manera simple, a partir de clasificaciones preestablecidas de uso del suelo.
3. Debe poder utilizarse para llevar a cabo análisis y evaluaciones del uso del suelo basadas en información integrada en sistemas de información geográfica (GIS).

4. Debe poder utilizarse a partir de cartografía obtenida mediante técnicas de GIS de alta resolución.
5. Su aplicación en la misma zona geográfica en diferentes momentos debe permitir el análisis de tendencias para así determinar el impacto de las medidas de corrección que se aplican a través de las herramientas de planificación ambiental.

El WEI está compuesto por los valores del índice ambiental  $EI_j$  (*environmental index*, en inglés) para cada uso de la tierra, teniendo en cuenta el examen conjunto de cinco factores de evaluación ( $F_i$ ):

$F_1$ : Naturaleza antrópica o natural de la actividad desarrollada en el suelo

$F_2$ : Consumo de agua asociado al uso de la tierra

$F_3$ : Degradación del suelo (uso de productos químicos)

$F_4$ : Sostenibilidad ambiental del uso de la tierra (estabilidad del ecosistema)

$F_5$ : Valor paisajístico de la actividad desarrollada en el área analizada

La determinación de los valores de los factores de evaluación para cada uso del suelo se realiza individualmente, de manera que se asigna un valor cuantitativo para cada factor  $F_i$  y el uso del suelo  $j$  (ecuación 4.1):

$$0 \leq F_{ij} \leq 100 \quad (4.1)$$

Para cada una de las categorías de uso del suelo incluidas en la leyenda de la SIOSE, el correspondiente índice ambiental ( $EI_j$ ) se ha obtenido como el valor del promedio ponderado de cada uno de los valores asignados a cada uno de los factores anteriores ( $F_i$ ), considerando los pesos correspondientes ( $\alpha_i$ ), como se muestra en las ecuaciones 4.2 y 4.3:

$$EI_j = \sum_{i=1}^5 \alpha_i F_{ij} \quad i = 1 \dots 5 \quad j = 1 \dots ncat \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1 \quad (4.3)$$

Donde:

$EI_j$ : índice ambiental de uso de la tierra  $j$  ( $0 \leq E_{ij} \leq 100$ )

$\alpha_i$ : pesos asignados al factor  $i$

$F_i$ : factor de evaluación  $i$

$ncat$ : categorías de uso del suelo

La aplicación de los valores del índice ambiental ( $EI_j$ ) se realiza sobre una discretización en los polígonos de superficie variable que juntos constituyen toda el área de estudio (ecuación 4.4):

$$A_{\text{total}} = \sum_{k=1}^{\text{npol}} A_k \quad (4.4)$$

donde:

$A_{\text{total}}$ : área total de estudio

$A_k$ : área del polígono k

npol: número total de polígonos en la discretización

Por lo tanto, una vez obtenidos los valores de los índices ambientales correspondientes a cada uso del suelo, el índice ambiental ponderado de un determinado polígono ( $WEI_k$ ) se determina en base a los valores del índice ambiental de cada uso del suelo incluido dentro del polígono, considerando como ponderaciones (ecuación 4.5) la proporción de la superficie asignada a cada uso del suelo con respecto a la superficie total del polígono, como se muestra en la ecuación (4.6).

$$\beta_{jk} = \frac{A_{jk}}{A_k} \quad k = 1 \dots \text{npol} \quad (4.5)$$

$$WEI_k = \sum_{j=1}^{n_{jk}} \beta_{jk} EI_j \quad j = 1 \dots n_{jk} \quad (4.6)$$

Donde:

$WEI_k$ : índice ambiental ponderado del polígono k

$EI_j$ : índice ambiental de uso del suelo j

$A_{jk}$ : área asignada al uso del suelo j dentro del polígono k

$\beta_{jk}$ : factor de ponderación del uso del suelo j en el polígono k

$n_{jk}$ : número de usos del suelo (j) dentro del polígono k

El valor del índice ambiental ponderado obtenido por la ecuación 4.6 adopta valores que varían entre 0 y 100, de modo que los valores cercanos a 0 indican un valor ambiental muy bajo, mientras que los valores cercanos a 100 indican un alto valor ambiental. Esto está de acuerdo con los cinco factores de evaluación ( $F_i$ ) considerados en la definición del índice ambiental para cada tipo de uso del suelo.

Así, los valores de  $WEI_k$  se determinan a partir de los valores de  $EI_j$ , que dependen de los valores asignados a los factores de evaluación ( $F_i$ ) y los pesos asociados a cada factor ( $\alpha_i$ ). Por lo tanto, el valor del índice  $WEI$  depende de los valores correspondientes de los factores de evaluación ( $F_i$ ) y sus correspondientes pesos ( $\alpha_i$ ). Los valores de  $F_i$  y  $\alpha_i$  deben ser decididos por el modelador sobre la base de los conocimientos de los expertos considerando el consejo local.

La tabla 4.1 muestra los valores del índice ambiental ponderado para cada uso del suelo ( $WEI_k$ ) incluido en la leyenda del SIOSE como resultado de la combinación lineal de los cinco factores de

evaluación ( $F_i$ ) considerados en la definición del índice. Para la obtención de los valores mostrados, se han considerado iguales los valores de los pesos asociados a cada factor ( $\alpha_i = 0,2$ ).

Tabla 4.1.- Valores básicos de los factores de evaluación ( $F_i$ ) para cada uso del suelo considerado por el SIOSE y valor final del Índice Ambiental Ponderado para un polígono de un solo uso ( $WEI_k$ )

Código	Descripción Uso del Suelo	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	WEI <sub>k</sub>
EDF	Edificaciones	20	40	20	15	5	20
ZAU	Zona verde artificial y Árboles urbanos	60	65	70	80	75	70
LAA	Cuerpos de agua artificial	65	85	85	65	50	70
VAP	Carretera, aparcamiento o zona peatonal	20	40	20	15	5	20
OCT	Otras construcciones	20	40	20	15	5	20
SNE	Suelo sin edificación	35	50	50	50	15	40
ZEV	Zonas de extracción	0	50	0	0	0	10
CHA	Cosecha de arroz	60	10	80	45	55	50
CHL	Otras cosechas diferentes al arroz	60	65	80	75	70	70
LFC	Cítricos	60	65	80	75	70	70
LFN	No Cítricos	60	65	80	75	70	70
LVI	Uva	60	65	80	75	70	70
LOL	Aceitunas	60	65	80	75	70	70
LOC	Otros cultivos leñosos	60	65	80	75	70	70
PRD	Prados	80	80	90	100	100	90
PST	Pastizales	80	80	80	80	80	80
FDC	Bosques de hoja caduca	100	100	100	100	100	100
FDP	Bosques de hoja perenne	100	100	100	100	100	100
CNF	Coníferas	100	100	100	100	100	100
MTR	Matorrales	70	70	70	70	70	70
PDA	Playas de arena	100	100	50	100	100	90
SDN	Suelo desnudo	70	50	20	20	40	40
ZQM	Zonas quemadas	0	50	0	0	0	10
RMB	Barrancos	20	50	20	50	60	40
ACM	Acantilados marinos	100	50	50	100	100	80
ARR	Suelo rocoso	80	50	30	30	60	50
CCH	Cantera de piedra	80	50	40	40	40	50
CLC	Flujos de lava	90	30	30	40	60	50
HPA	Pantanos	80	50	30	80	60	60
HSA	Salinas continentales	90	30	40	80	60	60
HMA	Pantanos	90	60	70	90	90	80
HSM	Salinas marinas	90	60	70	90	90	80
ACU	Flujos de agua	100	100	100	100	100	100
ALG	Lagos y lagunas	100	100	100	100	100	100
AEM	Presas y lagos artificiales	10	100	100	100	90	80
ALC	Lagunas costeras	100	100	100	100	100	100
AMO	Mares y océanos	100	100	100	100	100	100
	Sin predefinir	50	50	50	50	50	50
OVD	Aceitunas y uvas	60	65	80	75	70	70
AAR	Asentamiento agrícola residencial	40	50	60	50	50	50
UER	Huerto familiar	60	65	75	70	80	70
UCS	Centro urbano	30	30	10	20	10	20
UEN	Expansión de área urbana	30	30	10	20	10	20
UDS	Discontinuo	30	30	10	20	10	20
IPO	Área industrial bien ordenada	30	30	10	20	10	20
IPS	Área industrial no ordenada	30	30	10	20	10	20
IAS	Área industrial aislada	30	30	10	20	10	20
PAG	Agricultura, ganado	60	60	70	50	60	60
PFT	Bosque primario	100	100	100	100	100	100
PPS	Granja de peces	30	60	60	50	50	50

TCO	Oficinas y comercios	20	20	20	20	20	20
TCH	Hoteles	20	20	20	20	20	20
TPR	Parques recreativos	20	20	20	20	20	20
TCG	Campings	20	40	40	50	50	40
EAI	Administración institucional	20	20	20	20	20	20
ESN	Medicina y sanidad	20	20	20	20	20	20
ECM	Cementerios	20	20	20	20	20	20
EDU	Educación	20	20	20	20	20	20
EPN	Centros penitenciarios	20	20	20	20	20	20
ERG	Religión	20	20	20	20	20	20
ECL	Cultura	20	20	20	20	20	20
EDP	Deporte	25	15	20	20	20	20
ECG	Campo de golf	40	10	70	50	80	50
EPU	Parque urbano	60	65	70	80	75	70
NRV	Calles y carreteras	10	10	10	10	10	10
NRF	Trenes	10	10	10	10	10	10
NPO	Puertos	10	10	10	10	10	10
NAP	Aeropuertos	10	10	10	10	10	10
NEO	Plantas eólicas	10	10	10	100	20	30
NSL	Plantas solares	10	10	10	100	20	30
NCL	Plantas nucleares	0	0	0	0	0	0
NEL	Plantas eléctricas	0	0	0	0	0	0
NTM	Plantas térmicas	0	0	0	0	0	0
NHD	Plantas hidroeléctricas	10	10	10	10	10	10
NTC	Planta de telecomunicaciones	0	0	0	0	0	0
NDP	Depuradoras y potabilizadoras de agua	10	20	10	100	10	30
NCC	Canales	0	0	0	0	0	0
NDS	Plantas de desalinización	0	0	0	0	0	0
NVE	Vertederos	0	0	0	0	0	0
NPT	Plantas de tratamiento de residuos	0	0	0	0	0	0
PMX	Minas de extracción	10	10	10	10	10	10

Los valores mostrados en la tabla 4.1 pueden ser modificados o adaptados por el usuario en cada caso. El usuario es responsable de justificar los valores de  $F_i$  y  $\alpha_{ij}$ , para lo cual se debe tener en cuenta la existencia de condiciones particulares en el área de estudio que podría modificar los valores propuestos. Estos valores han sido diseñados para que los resultados finales en términos del índice WEI permitan la evolución del valor ambiental en una cierta región a estudiar, priorizando los usos naturales del suelo con bajo consumo de agua, baja degradación del suelo, alta sostenibilidad del ecosistema y alto valor paisajístico, tras una técnica de análisis de decisión multicriterio (ADMC). El ADMC se utiliza actualmente para establecer el valor de indicadores ambientales [92]–[94]. Al analizar un territorio, es necesario tener en cuenta que la evaluación de la sostenibilidad es un proceso de decisión basado en múltiples criterios que comprende los criterios económicos, sociales, y la práctica ambiental [95]. El propósito del ADMC es comparar y clasificar opciones alternativas y evaluar las consecuencias ambientales de acuerdo con los criterios establecidos [96]. La mayor fortaleza es la posibilidad de utilizar los criterios con sus propias dimensiones. La principal debilidad del ADMC es la subjetividad del paso de ponderación que se necesita para valorar los diferentes criterios [97].

La aplicación del WEI en cada uso del suelo considerado por la leyenda de SIOSE permite una clasificación que se establecerá en base a la discriminación por rangos que se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.- Valor ambiental en función del rango del WEI

<b>Rango del WEI</b>	<b>Valor Medioambiental</b>
$0 \leq WEI_k < 40$	Bajo
$40 \leq WEI_k < 70$	Medio
$70 \leq WEI_k \leq 100$	Alto

A modo de ejemplo, en [91] se hace una aplicación del WEI para realizar un análisis regional (territorio de la Comunidad Valenciana) utilizando un sistema de referencia geodésico ETR89 y el sistema geográfico universal UTM sobre la base de datos del SIOSE.

La figura 4.1 muestra la distribución espacial del WEI en los años 2005, 2009 y 2015 en la Comunidad Valenciana, y permiten identificar la posición de las áreas de mayor y menor valor ambiental. Los resultados de la figura 4.1 muestran que el valor ambiental más bajo ( $WEI < 50$ ) se encuentra en los alrededores de la ciudad de Valencia, situada en el centro de la costa este de la zona de estudio. El WEI más alto ( $WEI > 80$ ) se encuentra casi exclusivamente en la zona de montañas, no alteradas y situadas en el interior, donde las acciones humanas no son relevantes. La aplicación del WEI en la Comunidad Valenciana demuestra que este índice puede ser utilizado con éxito para analizar el estado del medio ambiente a nivel regional si se dispone de suficientes datos precisos. Además, el WEI nos permite analizar la evolución en el tiempo del valor ambiental.

La distribución espacial de las diferencias del WEI (figura 4.2) nos permite identificar fácilmente la posición de las zonas que han mejorado o empeorado su valor ambiental durante un período de diez años. Un análisis estadístico de la evolución temporal del WEI proporcionaría resultados valiosos desde el punto de vista de la gestión del uso del suelo y el impacto de las políticas implementado en el territorio. Este análisis se realizará en el siguiente capítulo para la aplicación práctica escogida.

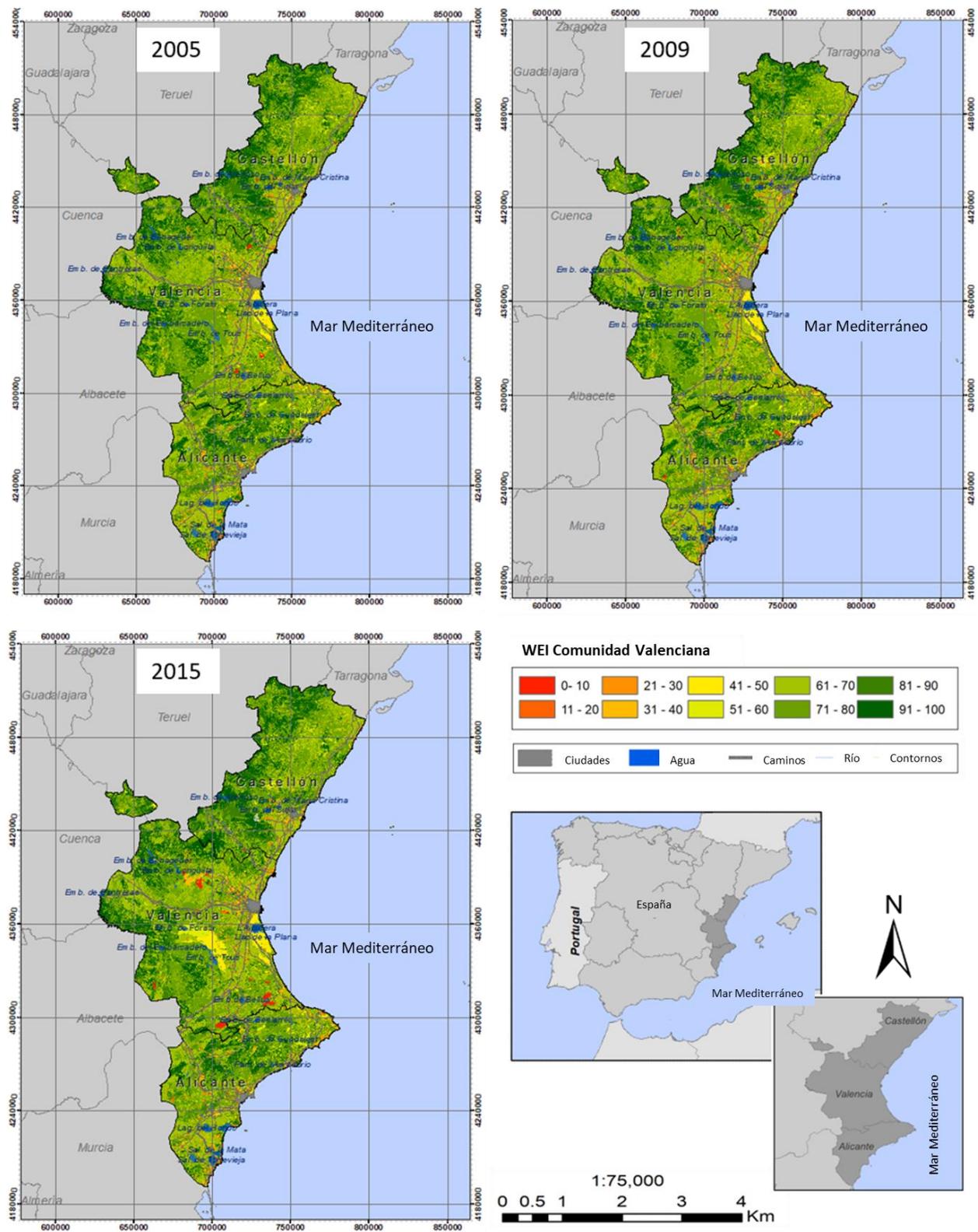


Figura 4.1.- Valores del WEI en la Comunidad Valenciana en 2005, 2009 y 2015

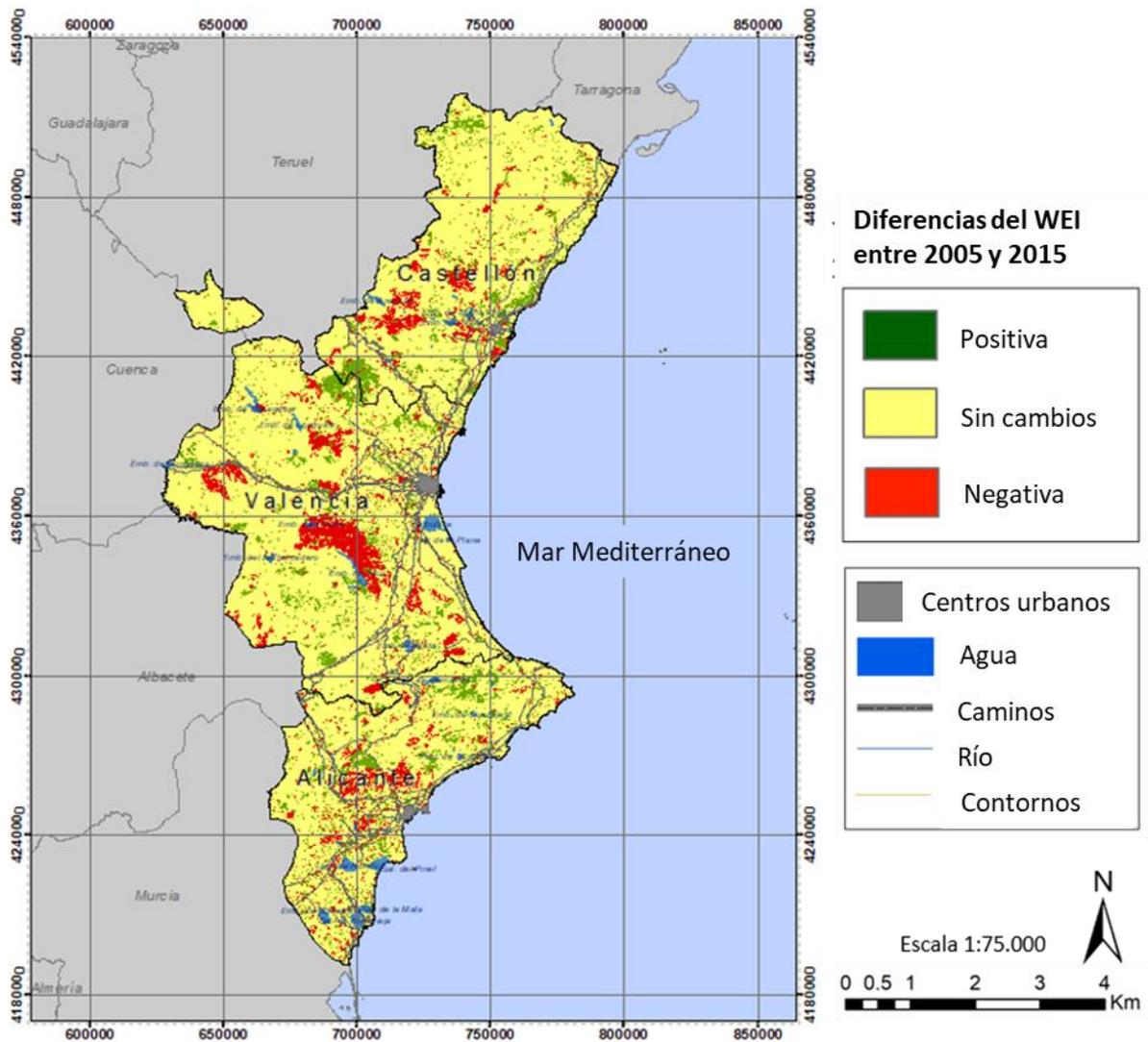


Figura 4.2.- Diferencias del WEI entre 2005 y 2015 en la Comunidad Valenciana

En la figura 4.2, los valores verdes representan las áreas en las que el valor del WEI ha aumentado en el periodo de observación (10 años), mientras que las áreas en color rojo representan aquellos territorios en los que el valor del WEI ha disminuido. La distribución especial de las diferencias del índice WEI permiten identificar fácilmente la posición de las áreas que han mejorado o empeorado su valor ambiental, pudiendo realizar más adelante estudios específicos que expliquen el porqué de esos cambios.

Por tanto, mediante el índice ambiental ponderado WEI se puede analizar el estado del medio ambiente a través de la evolución del uso del suelo a lo largo del tiempo.

## **5. APLICACIÓN PRÁCTICA. EVOLUCIÓN DEL USO DEL SUELO EN LAS PROXIMIDADES DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

Según la legislación española, un vertedero es una “instalación para la eliminación de residuos mediante depósito en superficie o subterráneo, por períodos de tiempo superior a un año en residuos no peligrosos y superior a seis meses para residuos peligrosos” [98]. De acuerdo con esta normativa, un vertedero almacena residuos en tierra de forma definitiva, y deben controlarse todos los aspectos ambientales con el objetivo de no afectar al entorno, o al menos, que estos efectos ambientales sean los mínimos posibles.

A pesar de que solamente se pueden depositar en el vertedero residuos que hayan sido tratados previamente y que no puedan ser aprovechados, reutilizados o reciclados, la mayor parte de los residuos generados en España y en los países del arco mediterráneo se vierten en estas instalaciones [99]. Por tanto, el vertedero se convierte en el último escalón de los sistemas de gestión de residuos, siendo un elemento fundamental a pesar de la creciente implantación de medidas de minimización de residuos, reciclaje y aumento de ciclo de vida.

La ubicación de este tipo de instalaciones de residuos se convierte en una tarea compleja, que engloba factores de diseño, económicos, ambientales y sociales. La existencia de vertederos de residuos puede afectar, por tanto, al territorio que le rodea, ocasionando la pérdida de valor del suelo, el cambio en las actividades y la pérdida de valor ambiental. Todos estos factores deben poder ser estudiados y controlados para comprobar la influencia de las instalaciones de residuos.

El índice WEI ofrece la posibilidad de analizar de forma local la evolución del uso del suelo en las proximidades de los vertederos de residuos sólidos urbanos. En este capítulo se estudiará dicha evolución en un radio de cinco kilómetros alrededor de los vertederos de residuos sólidos urbanos de Algimia de Alfara (Valencia) y Villena (Alicante).

### **5.2. LOCALIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ANALIZADOS**

Según la legislación autonómica [100], en el ámbito de la Comunidad Valenciana se dispone de dos planes de obligado cumplimiento en materia de gestión de residuos: el Plan Integral de Residuos (PIR) y los planes zonales. Según estos planes, en el territorio autonómico se distribuyen una serie de infraestructuras e instalaciones necesarias que garantizan la gestión de los residuos, respetando los principios de autosuficiencia y proximidad.

Los planes zonales son instrumentos de desarrollo y mejora del Plan Integral de Residuos, y en los documentos que lo forman se detallan las previsiones del PIR para cada zona que delimiten. Mediante estos planes autonómicos la Generalitat garantiza una adecuada dirección de la gestión de los residuos en toda la Comunidad Valenciana. La figura 5.1 muestra la distribución de los planes zonales de la Comunidad Valenciana.

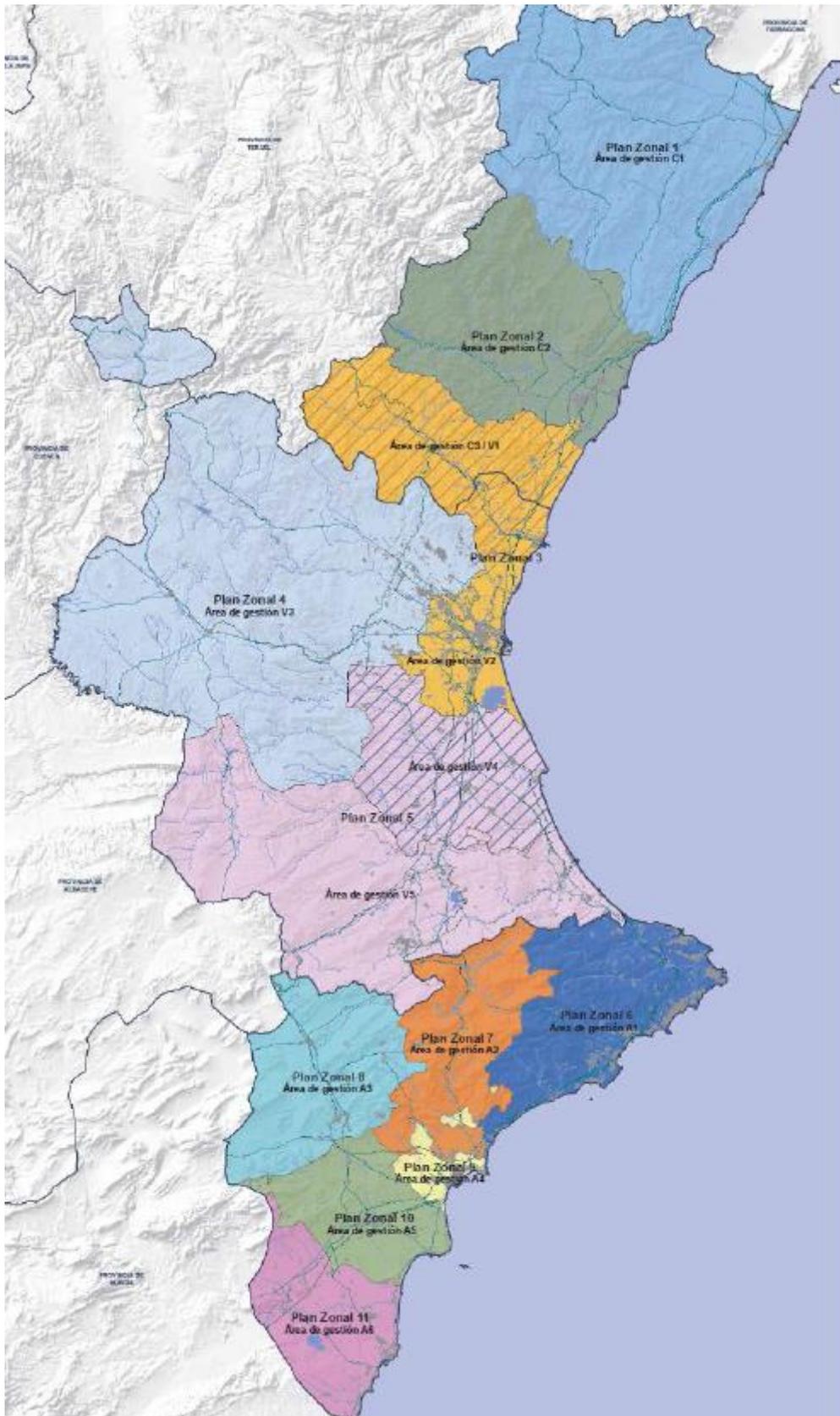


Figura 5.1.- Planes Zonales de residuos de la Comunidad Valenciana

El Área de Gestión C3/V1 pertenece al Plan Zonal de Residuos 3 y comprende las comarcas de Camp de Morvedre, Alto Palancia y Plana Baixa, dando servicio en materia de gestión de residuos a 56 municipios, en un área de 1.532 km<sup>2</sup>, con una población de 190.000 habitantes que generan cerca de 83.000 toneladas de residuos anuales. La instalación más importante de esta área de gestión es el Complejo de Valorización y Eliminación de Residuos Urbanos de Algimia de Alfara.

El Área de Gestión A3 pertenece al Plan Zonal de Residuos 8 y da servicio a 14 municipios pertenecientes a las comarcas de Alto Vinalopó, Medio Vinalopó y L'Alcoià. La superficie de este territorio a gestionar es de 1.287 km<sup>2</sup>, sirviendo a una población de 185.000 habitantes que genera más de 65.000 toneladas anuales de residuos. La instalación más importante de esta área de gestión es el Complejo de Valorización y Eliminación de Residuos Urbanos de Villena.

En la figura 5.2 se muestra la localización de todos los vertederos de residuos de los diferentes planes zonales de la Comunidad Valenciana, remarcando los vertederos objeto de estudio: Algimia de Alfara y Villena.

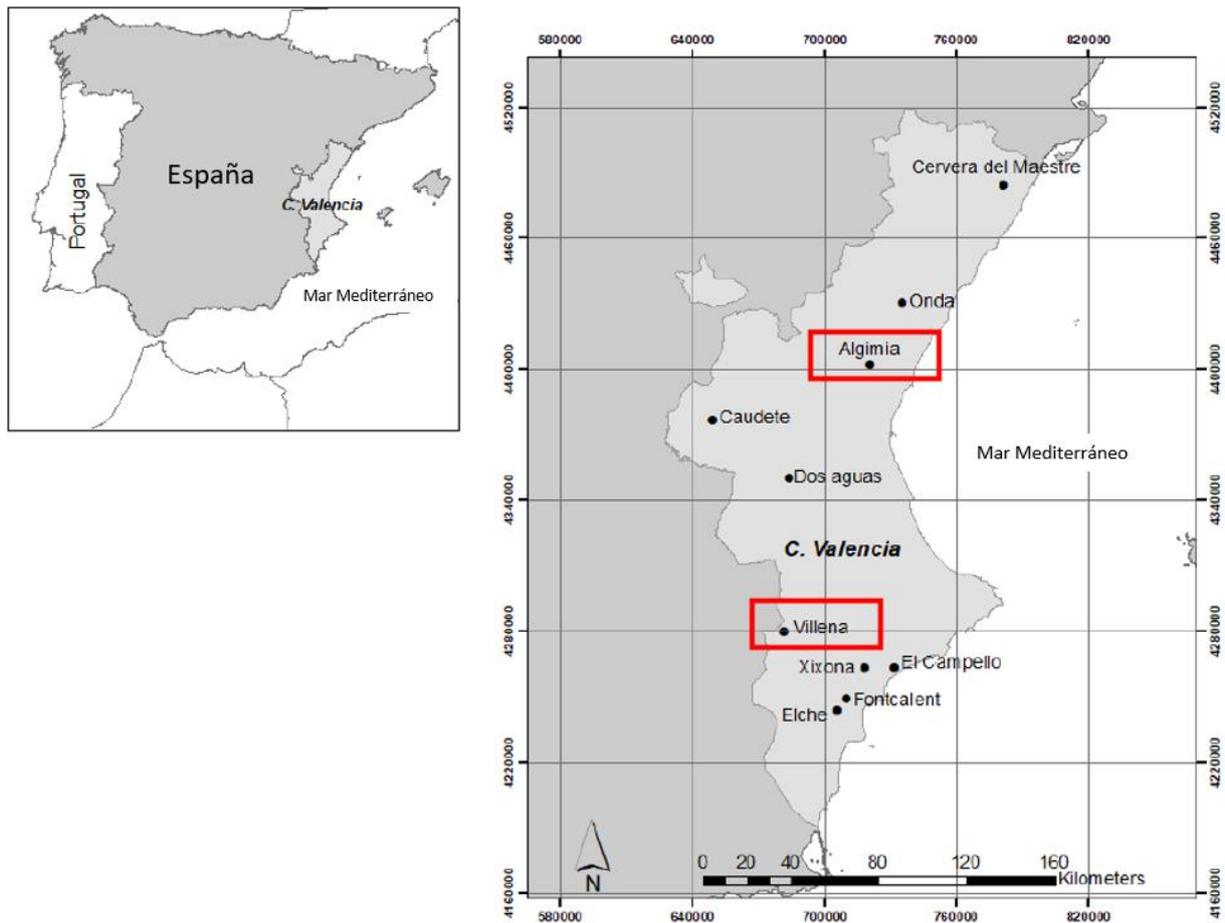


Figura 5.2.- Localización de los vertederos de Algimia de Alfara y Villena

### **5.3. APLICACIÓN DEL WEI AL VERTEDERO DE ALGIMIA DE ALFARA**

Mediante la aplicación ArcView [101], y tras proporcionar los valores del WEI para cada uso del suelo (tabla 4.1), se ha obtenido la distribución espacial del índice ambiental para los años 2005, 2009 y 2015, que son los años con datos de uso del suelo según el SIOSE (figuras 5.3 a 5.5).

En la figura 5.3, se puede comprobar que el vertedero de Algimia de Alfara no estaba todavía construido en el año 2005 (su emplazamiento estaría situado en el centro del círculo, marcado con un punto negro). Como se puede ver en la leyenda, las zonas de color rojo y naranja son aquellas que tienen un valor del WEI bajo, mientras que las zonas de color verde presentan un valor ambiental alto.

En la figura 5.4, el cambio más significativo que se observa a simple vista es el valor del WEI en el centro de la zona de estudio, señalando que el vertedero ya se encontraba construido (y en operación) en el año 2009. Se comprueba que el valor ambiental de esa infraestructura es el más bajo posible.

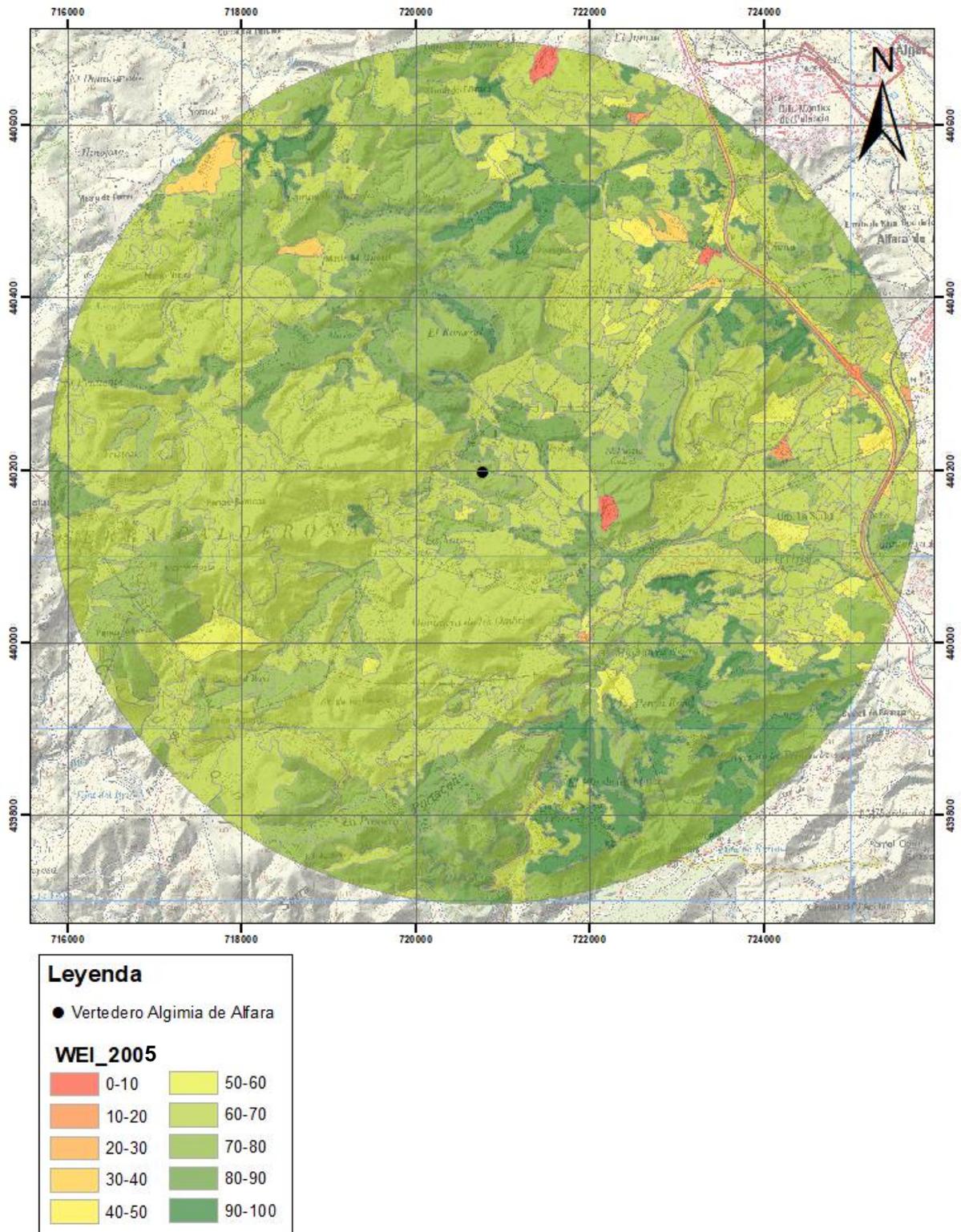


Figura 5.3.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2005

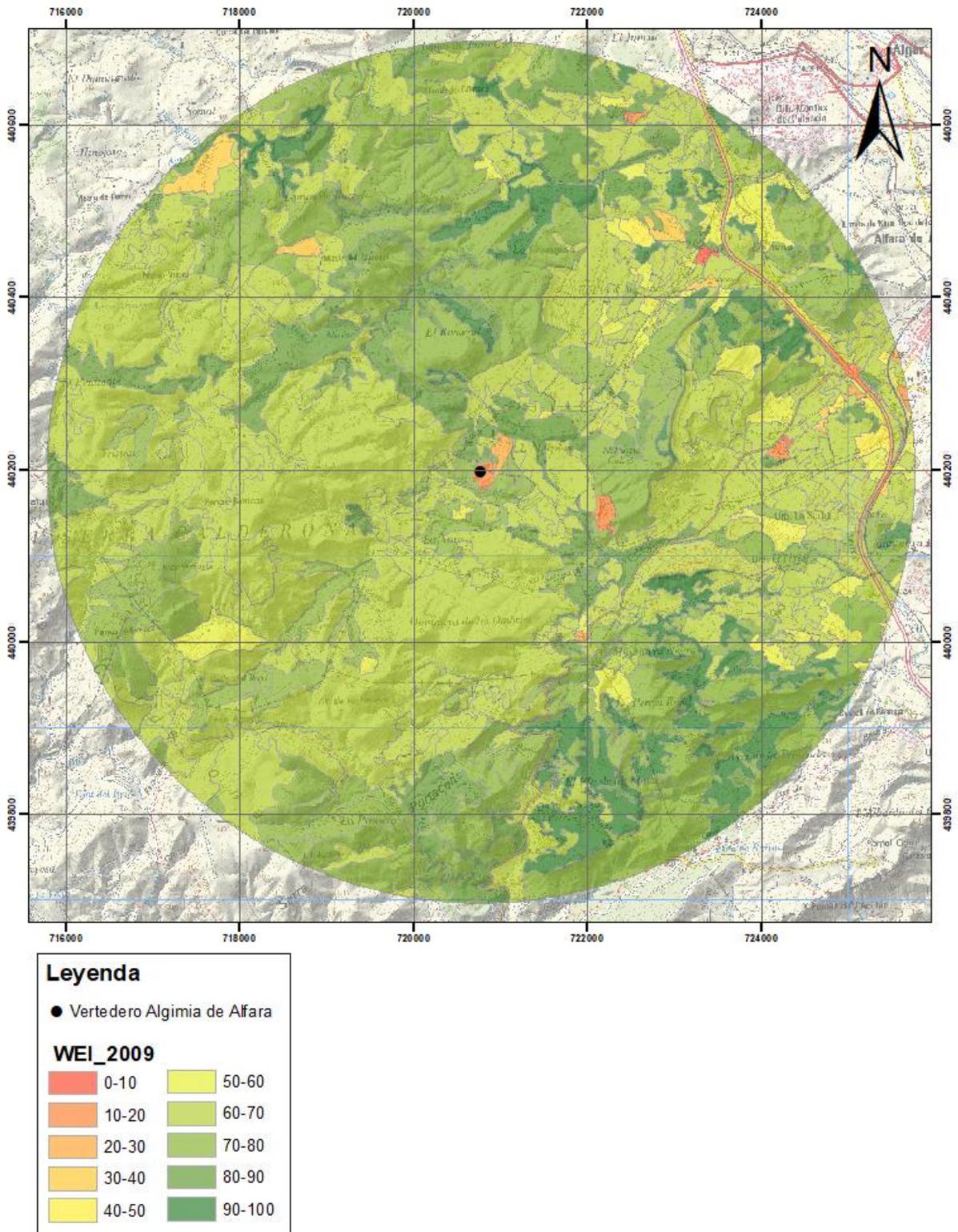


Figura 5.4.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2009

En el año 2015 (representado en la figura 5.5), se puede observar un gran cambio del valor del WEI en los polígonos situados al norte de la zona de estudio. Sería necesario un análisis más exhaustivo para poder determinar si esa modificación en el uso del suelo es debida a la existencia del vertedero o, por el contrario, no tiene nada que ver con esta instalación.

Un resultado muy interesante es el que proporciona el mapa de diferencias (figura 5.6), entre los años 2005 y 2015. En este mapa se puede comprobar fácilmente cuáles son los polígonos que han aumentado (color verde) o disminuido (color rojo) su valor ambiental a lo largo de esos diez años. La mayoría de los cambios en el uso del suelo se localizan al este de la zona de estudio. Deberían analizarse cuáles han sido esos cambios para determinar la influencia del vertedero. No obstante, es razonable pensar que aquellos polígonos más cercanos al depósito de residuos pueden haberse visto afectados por su existencia.

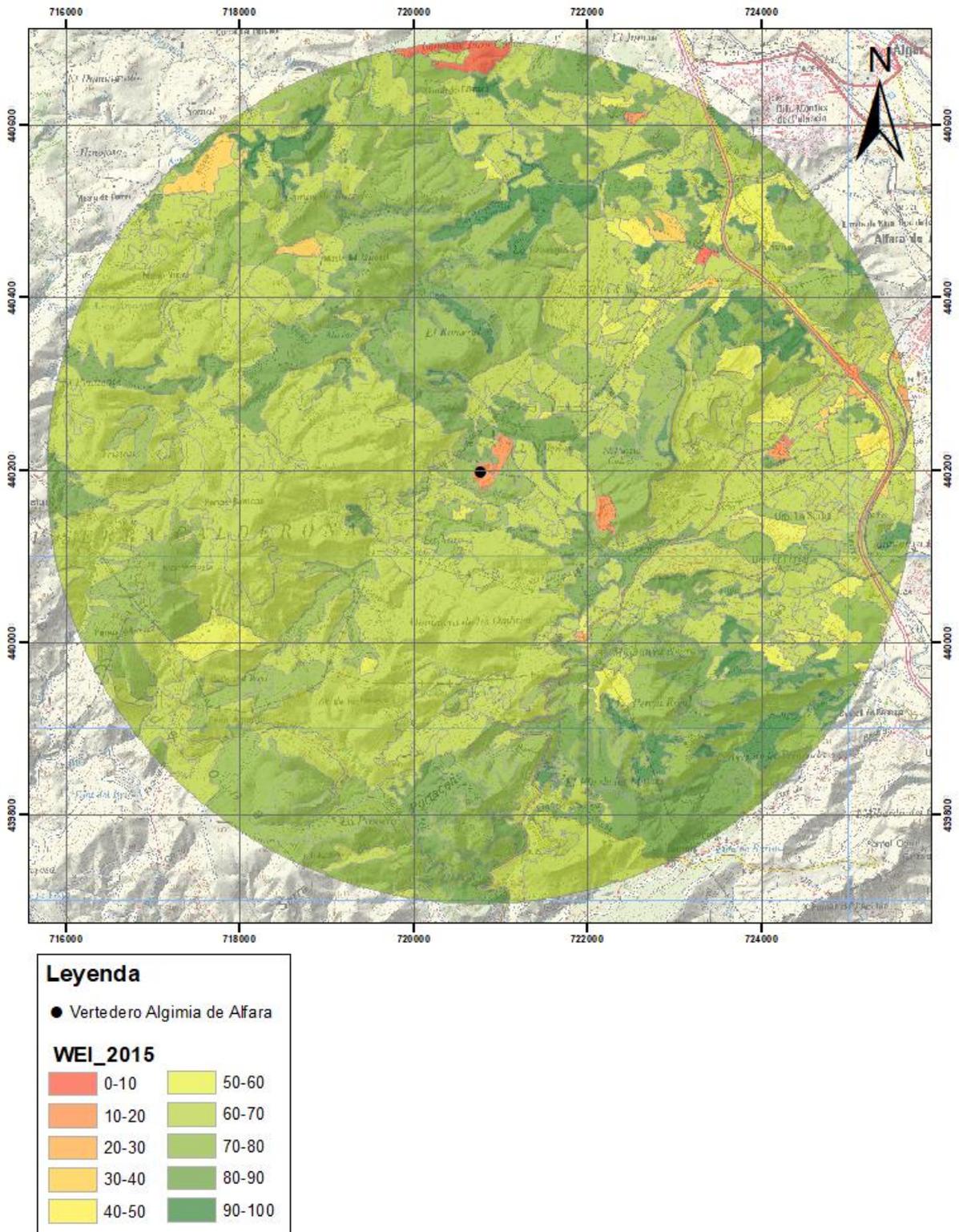


Figura 5.5.- Valores del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara en el año 2015

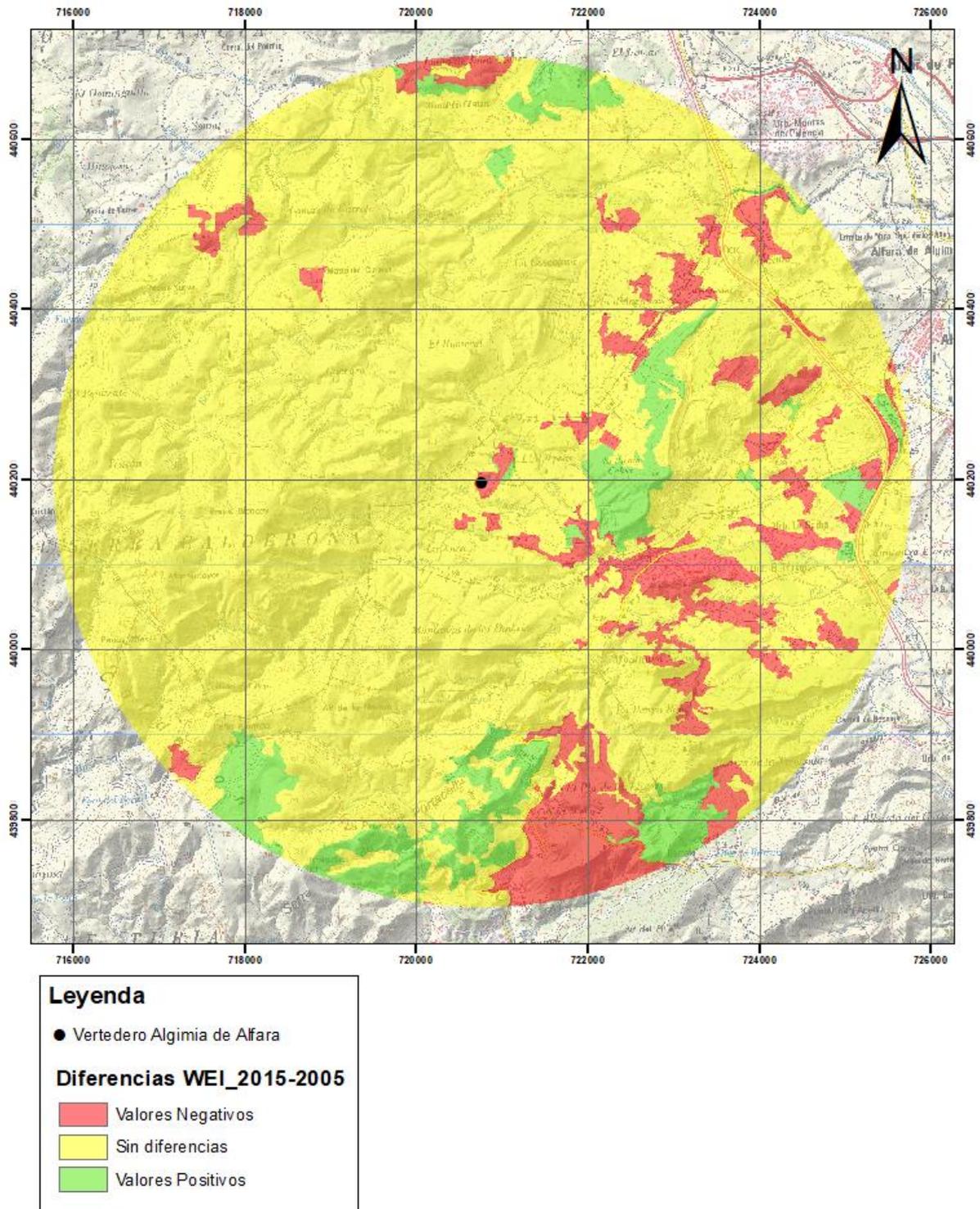


Figura 5.6.- Diferencias del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara entre los años 2005 y 2015

#### **5.4. APLICACIÓN DEL WEI AL VERTEDERO DE VILLENA**

Las figuras 5.7 a 5.9 muestran la distribución espacial del WEI en las proximidades del vertedero de Villena. En este caso, se observa que la zona analizada no es circular. Esto es debido a que el radio de 5 km excede los límites de la Comunidad Valenciana, quedando por tanto, fuera del análisis de este trabajo.

En la figura 5.7, se puede comprobar que el vertedero de Villena ya estaba en operación en el año 2005, ocupando una zona de considerable extensión en comparación con el vertedero de Algimia. En la parte este de la figura se localiza Villena, con un valor ambiental del WEI bajo, ya que se trata de una zona afectada antrópicamente.

En la figura 5.8, el vertedero de Villena ocupa aún una mayor extensión, por lo que se puede suponer que el valor ambiental de la zona será inferior al del año 2005. Estos valores del WEI se analizarán estadísticamente en el siguiente apartado.

Los cambios entre 2009 y 2015, representados en la figura 5.9, no se pueden apreciar a simple vista.

La figura 5.10 muestra el mapa de diferencias del valor del WEI entre 2005 y 2015, quedando de manifiesto aquellos polígonos que han variado su uso de suelo, a mayor y a menor valor ambiental del WEI. En este caso, la variación en el uso del suelo está más distribuida a lo largo de todo el territorio analizado, apreciándose una mayor extensión con disminución del valor del índice.

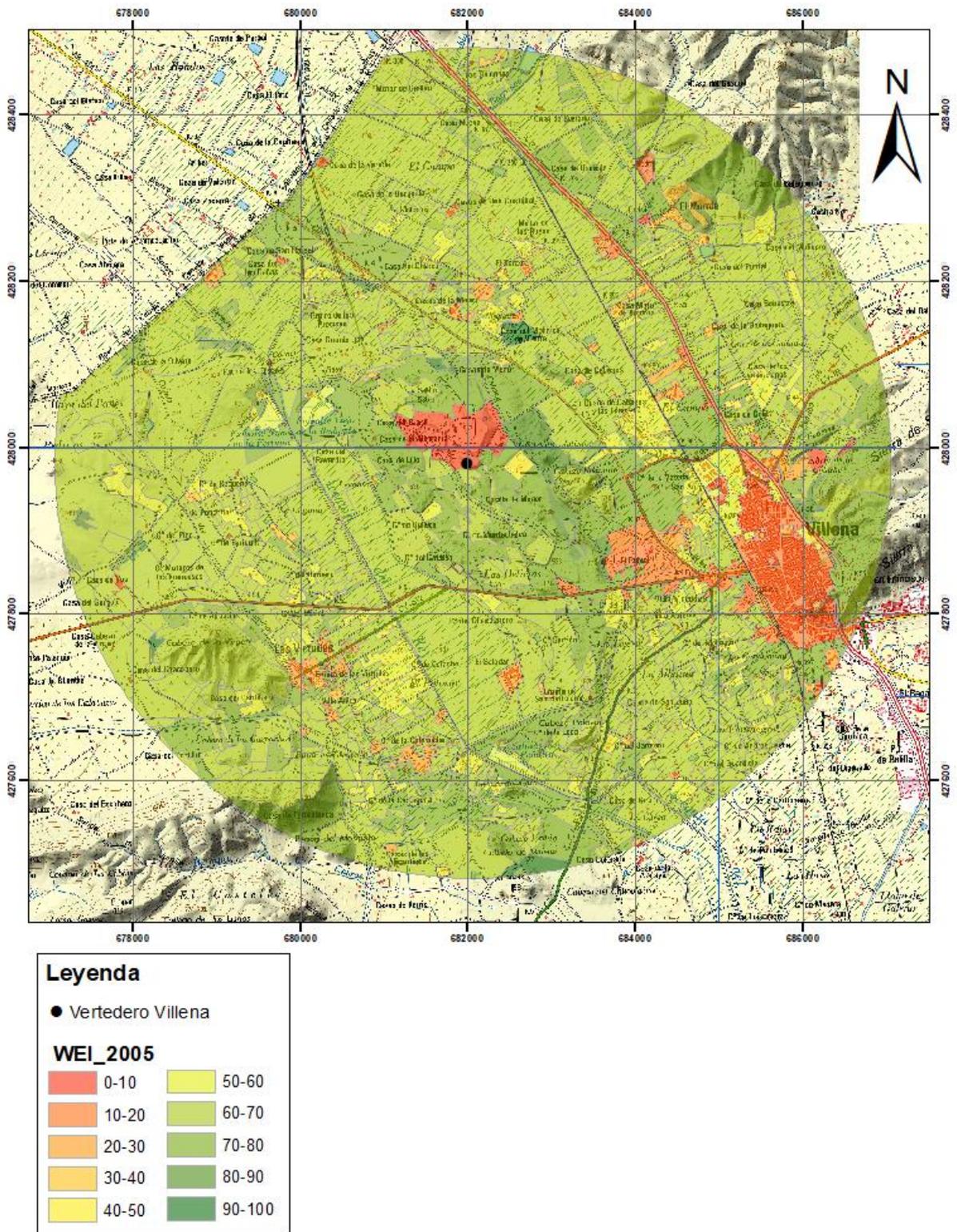


Figura 5.7.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2005

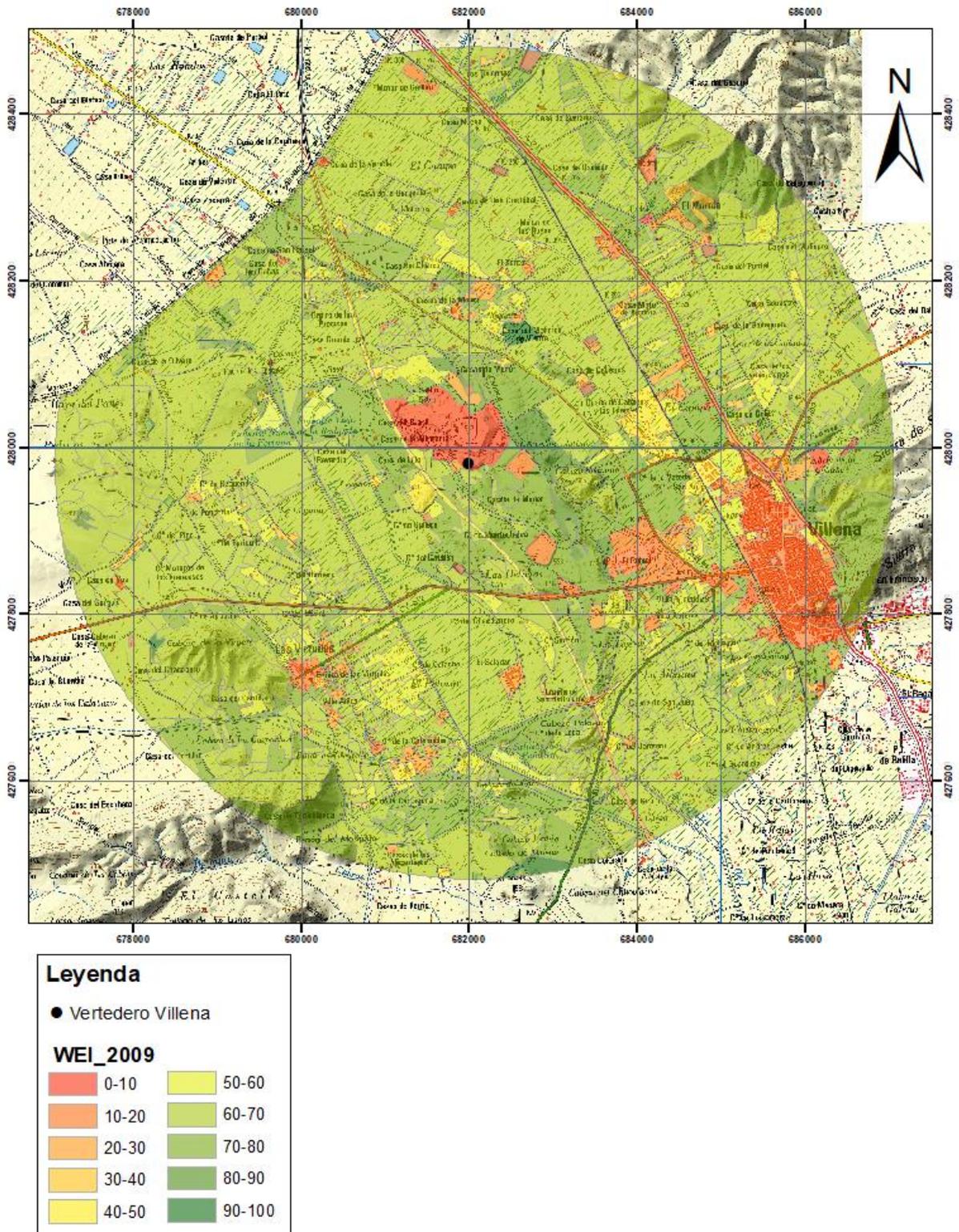


Figura 5.8.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2009

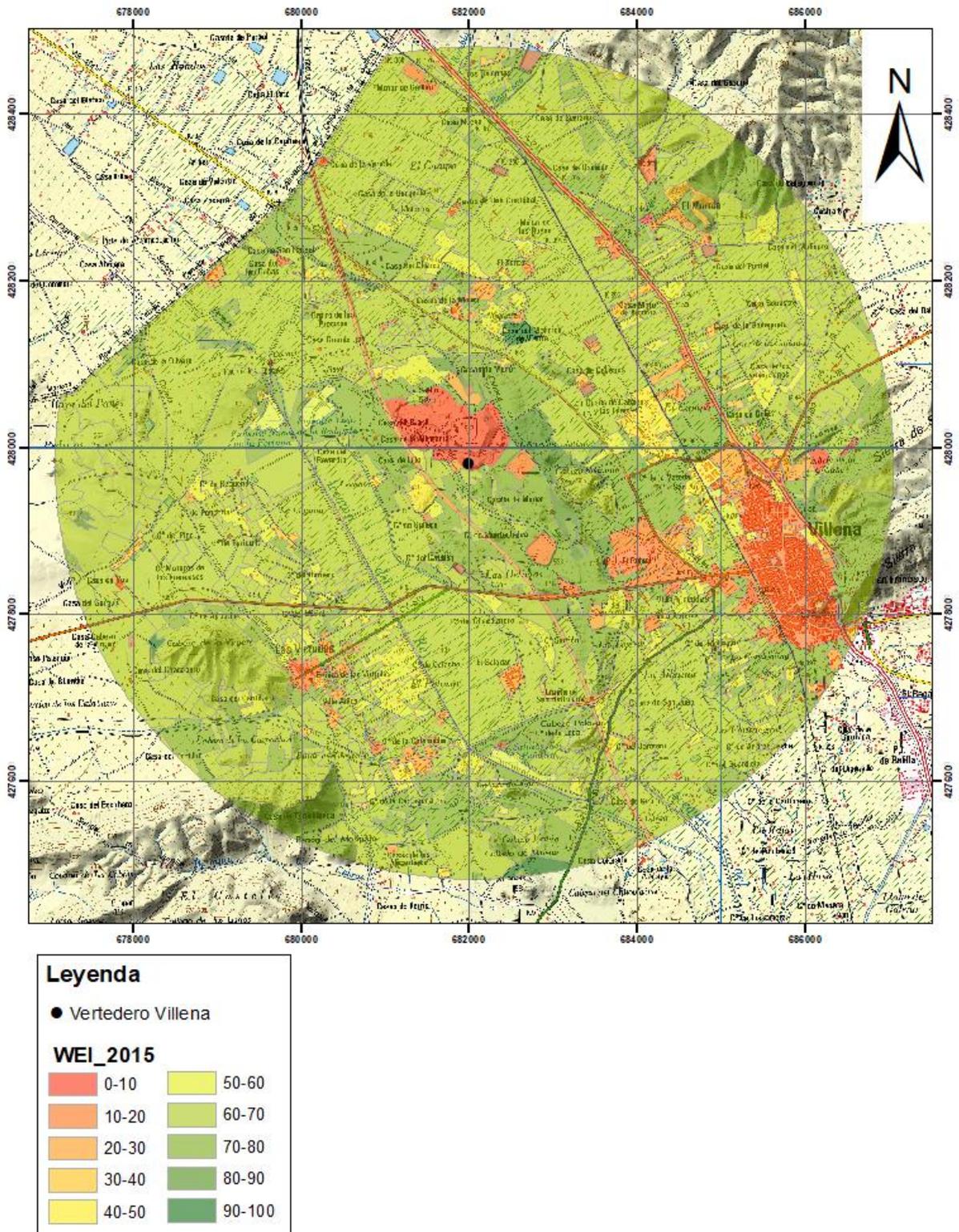


Figura 5.9.- Valores del WEI en el vertedero de Villena en el año 2015

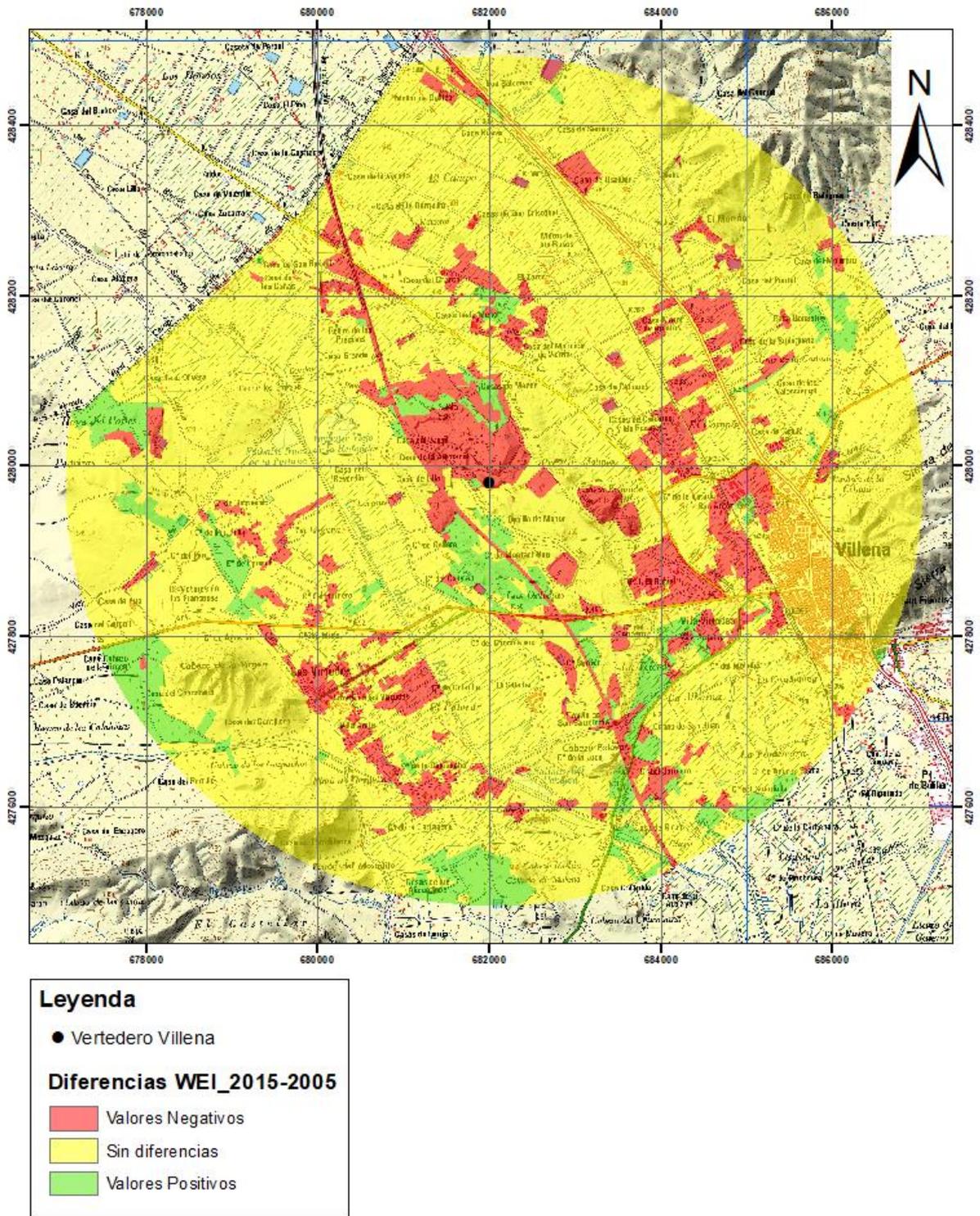


Figura 5.10.- Diferencias del WEI en el vertedero de Algimia de Alfara entre los años 2005 y 2015

## 5.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

### 5.5.1. Introducción

En este apartado se realiza un análisis estadístico de los resultados proporcionados por el GIS. Esta herramienta nos proporciona, para cada polígono de la zona de estudio, su superficie y el valor del WEI, ponderado según los usos de suelo contenidos en cada uno de dichos polígonos. La figura 5.11 muestra un ejemplo de la relación de dichos datos para un determinado año y vertedero, registrada en una hoja de cálculo.

	A	B	C
1	ID_POLYGON	SUPERF_HA	WEI_CV095
2	3f9c7f7f-ae1d-4262-ac85-26e7f315fbe9	1,064572087	10
3	8e5ba3f5-5f32-42b6-a922-6cd9e7df133d	3,13630215	17
4	a3e84108-511b-4e4a-87a9-def33df7d8ee	5,869579364	20
5	12faef27-de61-4a84-af1d-7673b73c36d6	8,520017006	20
6	e045a782-3fd7-4dbd-9725-75030f42d49e	3,832836711	22
7	e393e6d9-55e5-4529-8ef4-9f3039aabfd9	1,717359802	23
8	4f67f163-9078-42ab-b43f-85549ce0601f	2,47667427	25
9	a9299116-ca23-41f7-b6bf-f650e2937886	2,191317747	27
10	28ffe394-9212-4baa-94dd-79a7be622509	7,852363758	28
11	fa5b7c6b-1558-4df9-a740-7a3adf411f30	15,89925307	30
12	13806f8b-a3c8-415f-b9b2-a01e8742e2f5	9,049579045	30
13	6c03879f-3b9d-47ea-91d0-01d36994b54c	1,814444839	30
14	bedda037-48df-4f1a-a942-1d0924d3db91	1,983609842	30
15	0664b371-cfec-4b89-8872-5c81af38f67c	8,886825067	30
16	453be836-db0c-4b41-b125-68a72de09554	7,020025847	32
17	d2e2b600-61ae-486f-af72-06d1799869ae	0,029802376	33
18	ef67434d-d21f-449c-99fb-a98335e1602a	1,153188932	34
19	6a6ad65f-490b-4ea8-8484-1eb6388545e4	1,166856357	36
20	dac89245-2fca-4e5b-937d-d4c82db32518	2,019724296	38
21	4fa7d02e-c708-4517-ae4e-3f0d9b260f87	10,31658468	40
22	f2c26cef-ef85-44a8-90fd-53a45c477682	26,69107472	41,5
23	047048c6-e2a0-4972-bcbd-1fff5767d2a1	7,869285329	42
24	ffe7945b-004a-4e80-9d8b-6a1d3dcae16b	3,649146459	44,6
25	37bbc158-efa3-421a-9276-38ca78840089	2,875917757	45,5
26	51341651-d9b0-4dd0-8151-064be45173e1	1,437536853	46

Figura 5.11.- Resultados proporcionados por el GIS para un año determinado

Para poder establecer el valor del WEI para el conjunto de toda la zona de estudio es necesario calcular cuál es la contribución de cada polígono a dicho valor final del WEI. Para ello, es necesario realizar una serie de cálculos, tal como se muestra en la figura 5.12, obteniendo la superficie acumulada, su porcentaje respecto a la superficie total, el peso de cada polígono y su contribución al valor del WEI. Sumando estos últimos valores del WEI, según la importancia en superficie de cada polígono, se obtiene el valor del WEI para cada zona estudiada. Estos cálculos deben realizarse para cada año.

	A	B	C	D	E	F	G
1	ID_POLYGON	SUPERF_HA	WEI_CV095	SUPERF_ACUM_HAS	%SUPERF_ACUM	%WEIGHT	WEI CONTRIBUTION
2	3f9c7f7f-ae1d-4262-ac85-26e7f315fbe9	1,064572087	10	1,06	0,0136%	0,0136%	0,001355491
3	8e5ba3f5-5f32-42b6-a922-6cd9e7df133d	3,13630215	17	4,20	0,0535%	0,0399%	0,00678873
4	a3e84108-511b-4e4a-87a9-def33df7d8ee	5,869579364	20	10,07	0,1282%	0,0747%	0,014947159
5	12faef27-de61-4a84-af1d-7673b73c36d6	8,520017006	20	18,59	0,2367%	0,1085%	0,021696623
6	e045a782-3fd7-4dbd-9725-75030f42d49e	3,832836711	22	22,42	0,2855%	0,0488%	0,010736548
7	e393e6d9-55e5-4529-8ef4-9f3039aabfd9	1,717359802	23	24,14	0,3074%	0,0219%	0,005029338
8	4f67f163-9078-42ab-b43f-85549ce0601f	2,47667427	25	26,62	0,3389%	0,0315%	0,007883709
9	a9299116-ca23-41f7-b6bf-f650e2937886	2,191317747	27	28,81	0,3668%	0,0279%	0,007533396
10	28ffe394-9212-4baa-94dd-79a7be622509	7,852363758	28	36,66	0,4668%	0,1000%	0,027994978
11	fa5b7c6b-1558-4df9-a740-7a3adf411f30	15,89925307	30	52,56	0,6692%	0,2024%	0,060732291
12	13806f8b-a3c8-415f-b9b2-a01e8742e2f5	9,049579045	30	61,61	0,7845%	0,1152%	0,034567767
13	6c03879f-3b9d-47ea-91d0-01d36994b54c	1,814444839	30	63,42	0,8076%	0,0231%	0,006930853
14	bedda037-48df-4f1a-a942-1d0924d3db91	1,983609842	30	65,41	0,8328%	0,0253%	0,007577033
15	0664b371-cfec-4b89-8872-5c81af38f67c	8,886825067	30	74,29	0,9460%	0,1132%	0,003946076
16	453be836-db0c-4b41-b125-68a72de09554	7,020025847	32	81,31	1,0354%	0,0894%	0,02860292
17	d2e2b600-61ae-486f-af72-06d1799869ae	0,029802376	33	81,34	1,0357%	0,0004%	0,000125224
18	ef67434d-d21f-449c-99fb-a98335e1602a	1,153188932	34	82,50	1,0504%	0,0147%	0,004992305
19	6a6ad65f-490b-4ea8-8484-1eb6388545e4	1,166856357	36	83,66	1,0653%	0,0149%	0,005348618
20	dac89245-2fca-4e5b-937d-d4c82db32518	2,019724296	38	85,68	1,0910%	0,0257%	0,009772313
21	4fa7d02e-c708-4517-ae4e-3f0d9b260f87	10,31658468	40	96,00	1,2224%	0,1314%	0,052543334
22	f2c26cef-ef85-44a8-90fd-53a45c477682	26,69107472	41,5	122,69	1,5622%	0,3399%	0,141037904
23	047048c6-e2a0-4972-bcbd-1fff5767d2a1	7,869285329	42	130,56	1,6624%	0,1002%	0,042082959
24	ffe7945b-004a-4e80-9d8b-6a1d3dcae16b	3,649146459	44,6	134,21	1,7089%	0,0465%	0,020722772

Figura 5.12.- Determinación del valor del WEI para la zona de estudio

### 5.5.2. Vertedero de Algimia de Alfara

La figura 5.13 y la tabla 5.1 muestran la evolución del valor medio del WEI en las proximidades del vertedero de Algimia de Alfara en el periodo 2005-2015.

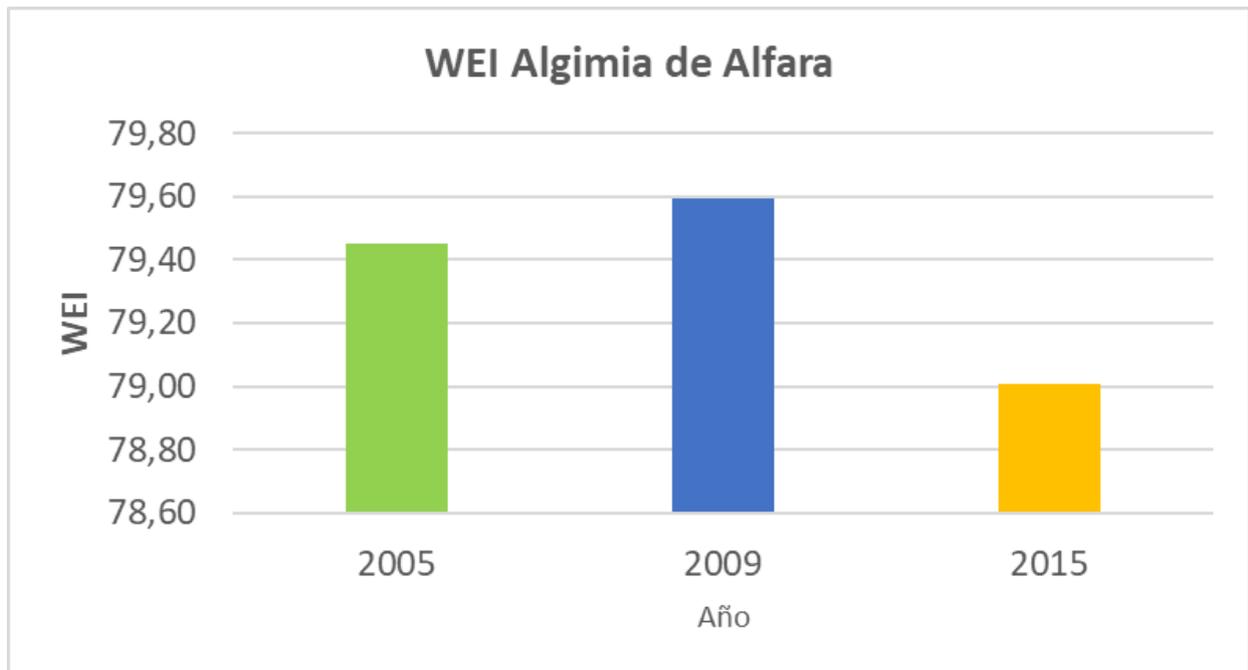


Figura 5.13.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara

Tabla 5.1.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara

Año	WEI
2005	79,45
2009	79,59
2015	79,01
2015-2005	-0,6%

En 2005, el valor del WEI era 79,45, mientras que en 2009 su valor era de 79,59. Esto supone un aumento del 0,2% en el valor del WEI en esos cuatro años. Sin embargo, en el año 2015 se produce una disminución del WEI de 0,6%, hasta llegar al valor de 79,01.

Realizando un análisis más profundo de los resultados arrojados por el GIS y procesados en una hoja de cálculo, se puede obtener más información acerca de la distribución del WEI en la zona de estudio a partir de los datos del SIOSE. Esta base de datos divide el territorio en un número diferente de polígonos en función del año estudiado (504, 506 y 501 para 2005, 2009 y 2015, respectivamente), y la distribución estadística de los valores del WEI proporciona una visión comprensible de la evolución del estado ambiental en el periodo 2005-2015.

La tabla 5.2 muestra los valores de los deciles de la función de distribución del WEI para cada uno de los años contemplados en este trabajo (que son los que contienen información del SIOSE) y sus áreas, en hectáreas y porcentaje respecto del total.

Tabla 5.2.- Deciles de la función de distribución del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara

WEI	Frecuencia absoluta (número de polígonos)			Superficie de clase (Has)			% Superficie de clase		
	2005	2009	2015	2005	2009	2015	2005	2009	2015
[0,10[	0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%
[10,20[	3	2	3	19,69	4,20	29,83	0,25%	0,05%	0,38%
[20,30[	5	7	8	18,28	32,46	39,48	0,23%	0,41%	0,50%
[30,40[	8	10	9	40,83	49,02	42,00	0,52%	0,62%	0,53%
[40,50[	5	6	6	49,96	52,83	52,83	0,64%	0,67%	0,67%
[50,60[	4	4	4	22,97	22,97	22,97	0,29%	0,29%	0,29%
[60,70[	42	42	42	233,49	263,73	263,73	2,97%	3,36%	3,36%
[70,80[	256	250	251	3937,99	3859,14	3900,36	50,14%	49,14%	49,66%
[80,90[	99	102	97	2309,68	2305,99	2216,84	29,41%	29,36%	28,23%
[90,100]	82	83	81	1220,83	1263,39	1285,70	15,54%	16,09%	16,37%
Total	504	506	501	7853,77	7853,77	7853,77	100%	100%	100%

La figura 5.14 muestra de forma gráfica las funciones de distribución acumulada para cada uno de los años estudiados.

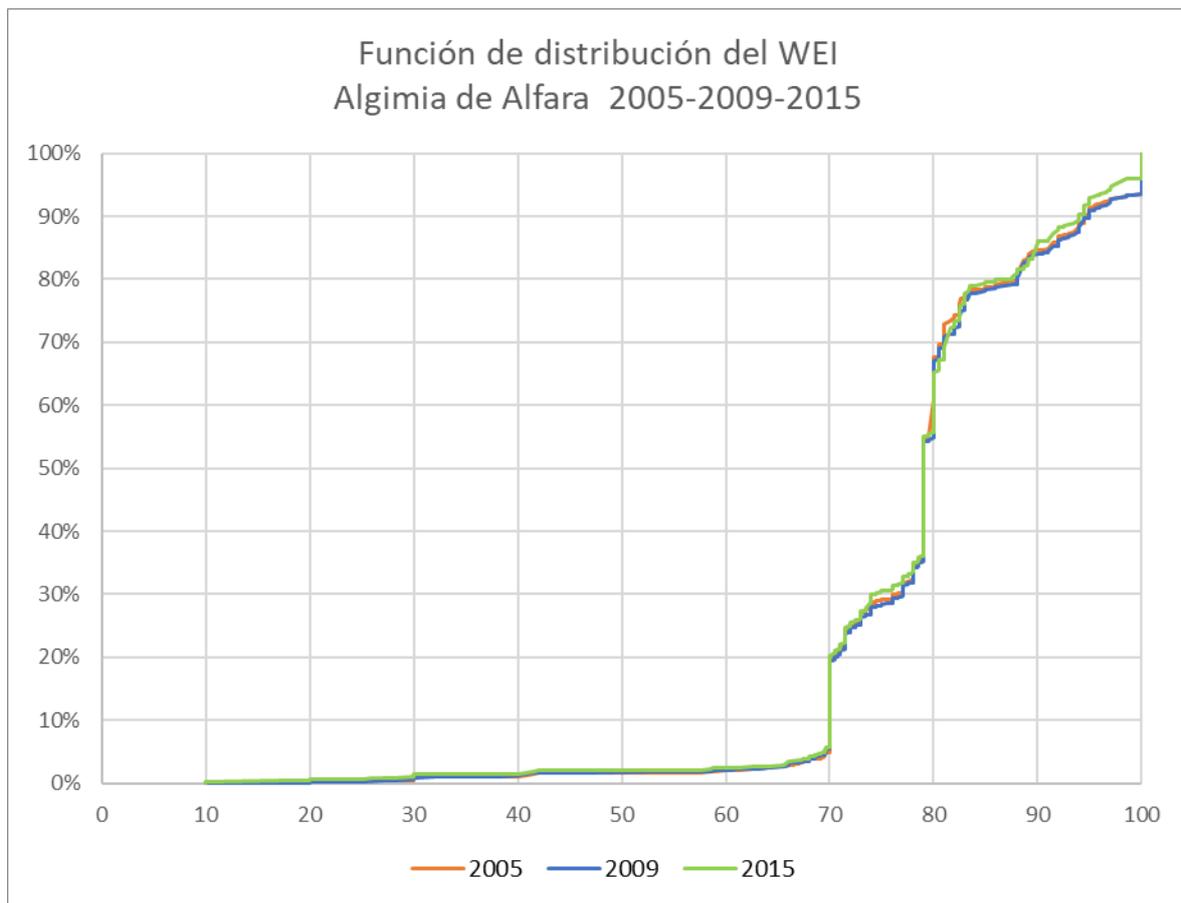


Figura 5.14.- Funciones de distribución acumulada del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara

A pesar de variar los valores del WEI, estos cambios no son sustanciales, tal y como puede apreciarse en la forma de las funciones de distribución. La tendencia que se observa es hacia valores altos del WEI, acorde con los valores obtenidos, mayores a 79 para los tres años.

La tabla 5.3 muestra las diferencias entre cada uno de los deciles para cada año.

Tabla 5.3.- Diferencias entre los deciles de la función de distribución. Vertedero de Algimia de Alfara

WEI	Superficie de clase (%)			Diferencias (%)		
	2005	2009	2015	2009-2005	2015-2009	2015-2005
[0,10[	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
[10,20[	0,25%	0,05%	0,38%	-0,20%	0,33%	0,13%
[20,30[	0,23%	0,41%	0,50%	0,18%	0,09%	0,27%
[30,40[	0,52%	0,62%	0,53%	0,10%	-0,09%	0,01%
[40,50[	0,64%	0,67%	0,67%	0,04%	0,00%	0,04%
[50,60[	0,29%	0,29%	0,29%	0,00%	0,00%	0,00%
[60,70[	2,97%	3,36%	3,36%	0,38%	0,00%	0,38%
[70,80[	50,14%	49,14%	49,66%	-1,00%	0,52%	-0,48%
[80,90[	29,41%	29,36%	28,23%	-0,05%	-1,14%	-1,18%
[90,100]	15,54%	16,09%	16,37%	0,54%	0,28%	0,83%

Las figuras 5.15 a 5.18 muestran de forma gráfica los resultados de la tabla 5.3.

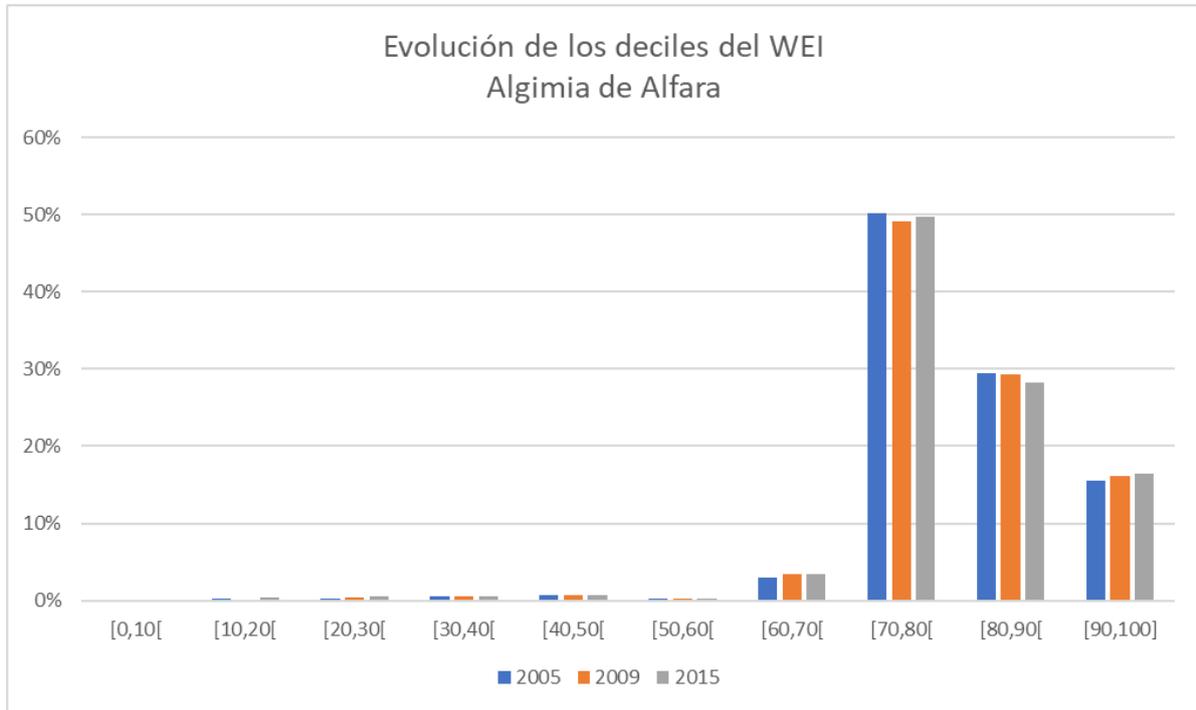


Figura 5.15.- Evolución de los deciles del WEI. Vertedero de Algimia de Alfara

En la figura 5.15 se puede observar que el máximo valor para cada uno de los años siempre se obtiene para la clase [70,80[, situándose en los tres años en valores cercanos al 50%.

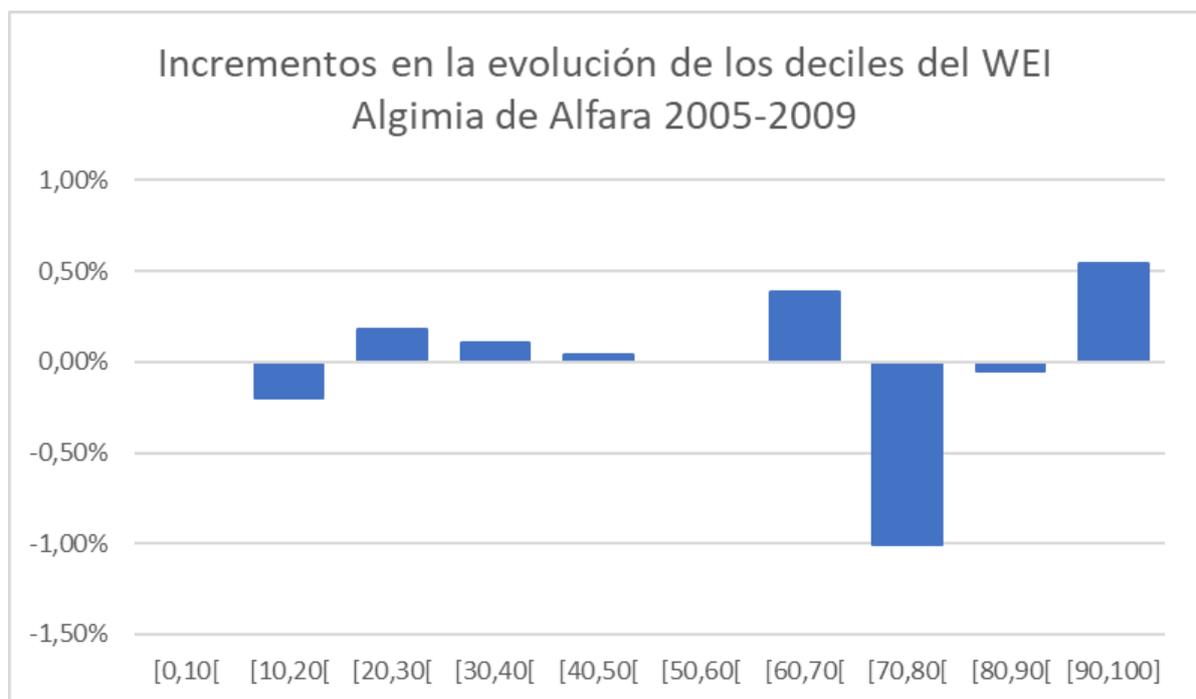


Figura 5.16.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2005-2009. Vertedero de Algimia de Alfara

En la figura 5.17 se observa un aumento del decil superior [90,100], que conduce a aumento del valor global del WEI. Sin embargo, también se observa un aumento de deciles inferiores, procedente en parte por la disminución del decil [70,80]. No obstante, en conjunto resulta un aumento del valor ambiental.

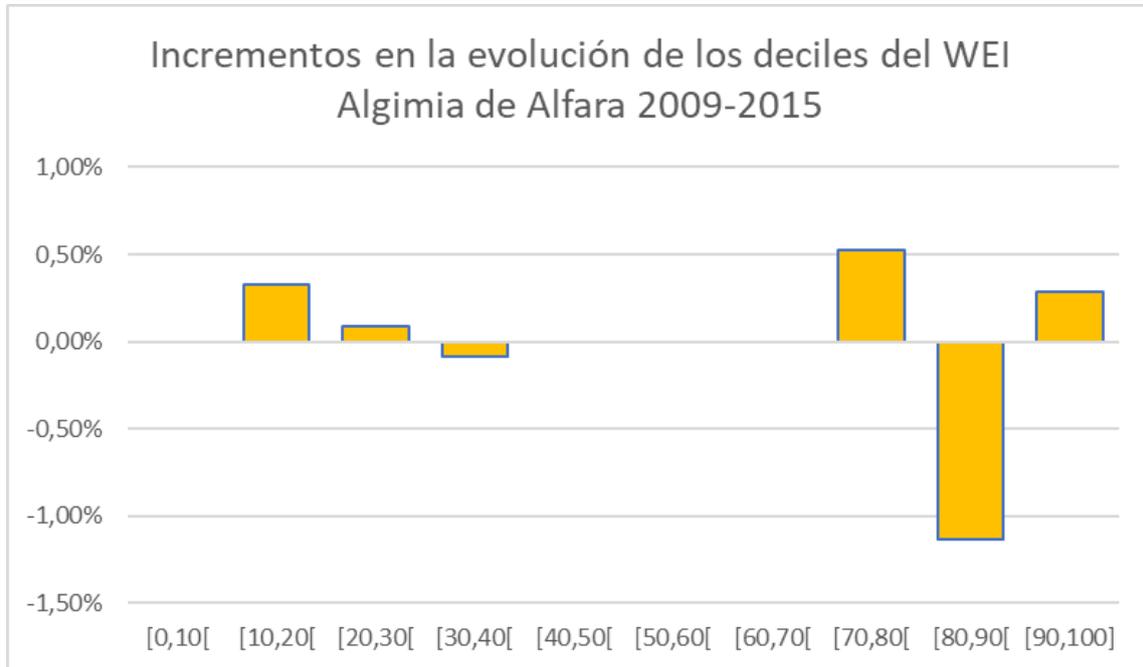


Figura 5.17.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfara

En la figura 5.18 se comprueba como disminuye el decil [80,90[ de forma notable y, aunque parte se dirige hacia el decil superior, el resto se coloca en el decil [70,80[ e incluso menores, provocando la caída del valor ambiental hasta un valor de 79,01.

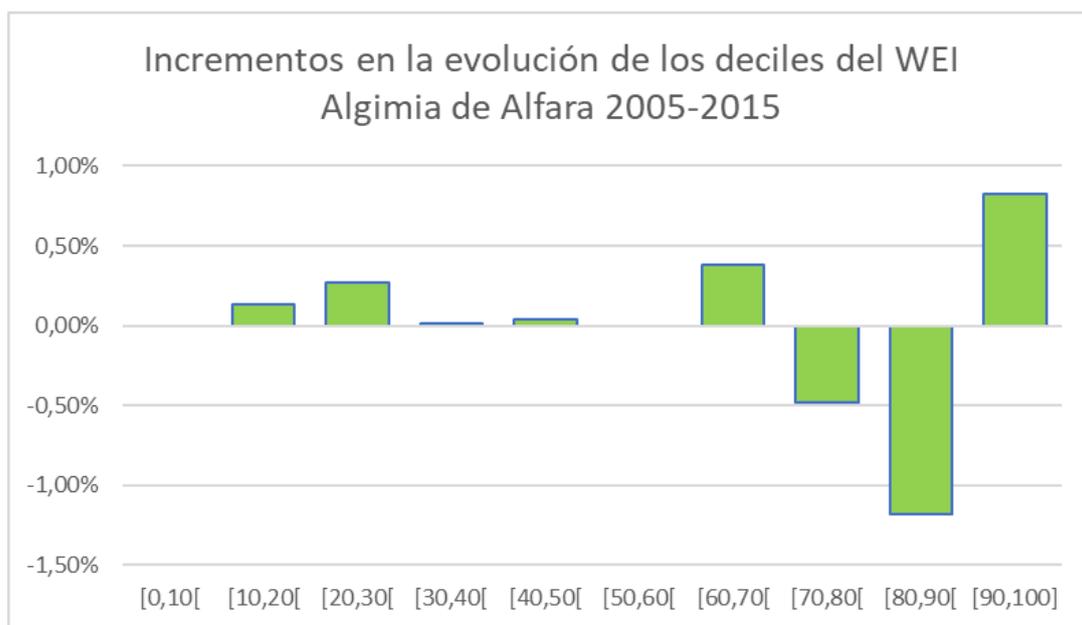


Figura 5.18.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfara

La figura 5.18 muestra la variación total de los incrementos de los deciles en el periodo estudiado, observando como hay una disminución en los deciles [70,80[ y [80,90[, recogida mayoritariamente en deciles inferiores. No obstante, también existe un aumento del decil superior, indicando que hay zonas que han cambiado su uso de suelo hacia usos con mejor valoración ambiental.

### 5.5.3. Vertedero de Villena

La figura 5.19 y la tabla 5.4 muestran la evolución del valor medio del WEI en las proximidades del vertedero de Villena en el periodo 2005-2015.

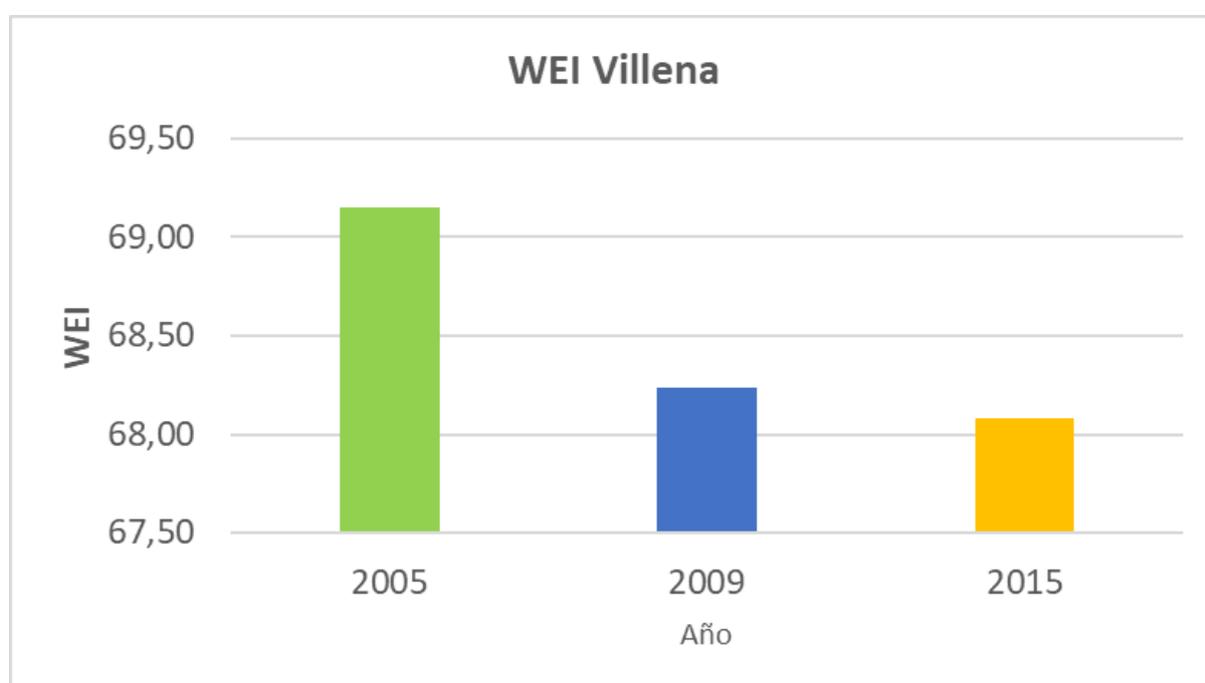


Figura 5.19.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Villena

Tabla 5.4.- Evolución del valor medio del WEI. Vertedero de Villena

Año	WEI
2005	69,15
2009	68,23
2015	68,08
2015-2005	-1,5%

En 2005, el valor del WEI era 69,15, mientras que en 2009 su valor era de 68,23. Esto supone una disminución del 1,3% en el valor del WEI en esos cuatro años. Sin embargo, en el año 2015 tan sólo se produce una disminución del WEI de 0,22%, hasta llegar al valor de 68,08. Esta estabilización del WEI en el año 2015 con respecto al año 2009 puede deberse a la aplicación de políticas ambientales

en la zona, aspecto que debería comprobarse y estudiarse en detalle para constatar la poca influencia que en ese periodo ha tenido la existencia del vertedero en los alrededores.

La tabla 5.5 muestra los valores de los deciles de la función de distribución del WEI para cada uno de los años contemplados en este trabajo (que son los que contienen información del SIOSE) y sus áreas, en hectáreas y porcentaje respecto del total.

Tabla 5.5.- Deciles de la función de distribución del WEI. Vertedero de Villena

WEI	Frecuencia absoluta (número de polígonos)			Superficie de clase (Has)			% Superficie de clase		
	2005	2009	2015	2005	2009	2015	2005	2009	2015
[0,10[	0	0	0	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%
[10,20[	4	4	4	77,11	97,57	97,57	1,04%	1,32%	1,32%
[20,30[	28	45	46	275,83	339,73	341,19	3,72%	4,58%	4,60%
[30,40[	45	57	58	183,48	218,97	264,18	2,47%	2,95%	3,56%
[40,50[	24	20	24	75,68	64,55	71,69	1,02%	0,87%	0,97%
[50,60[	9	15	16	25,43	124,20	88,54	0,34%	1,67%	1,19%
[60,70[	78	83	81	448,01	429,40	416,68	6,04%	5,79%	5,62%
[70,80[	367	334	326	4719,02	4622,03	4617,84	63,62%	62,31%	62,26%
[80,90[	87	91	93	1513,00	1419,20	1417,95	20,40%	19,13%	19,12%
[90,100]	11	11	11	99,62	101,53	101,53	1,34%	1,37%	1,37%
Total	653	660	659	7417,22	7417,22	7417,22	100%	100%	100%

La figura 5.20 muestra de forma gráfica las funciones de distribución acumulada para cada uno de los años estudiados.

A pesar de variar los valores del WEI, estos cambios no son sustanciales, tal y como puede apreciarse en la forma de las funciones de distribución. La tendencia que se observa es hacia valores altos del WEI, acorde con los valores obtenidos, mayores a 68 para los tres años.

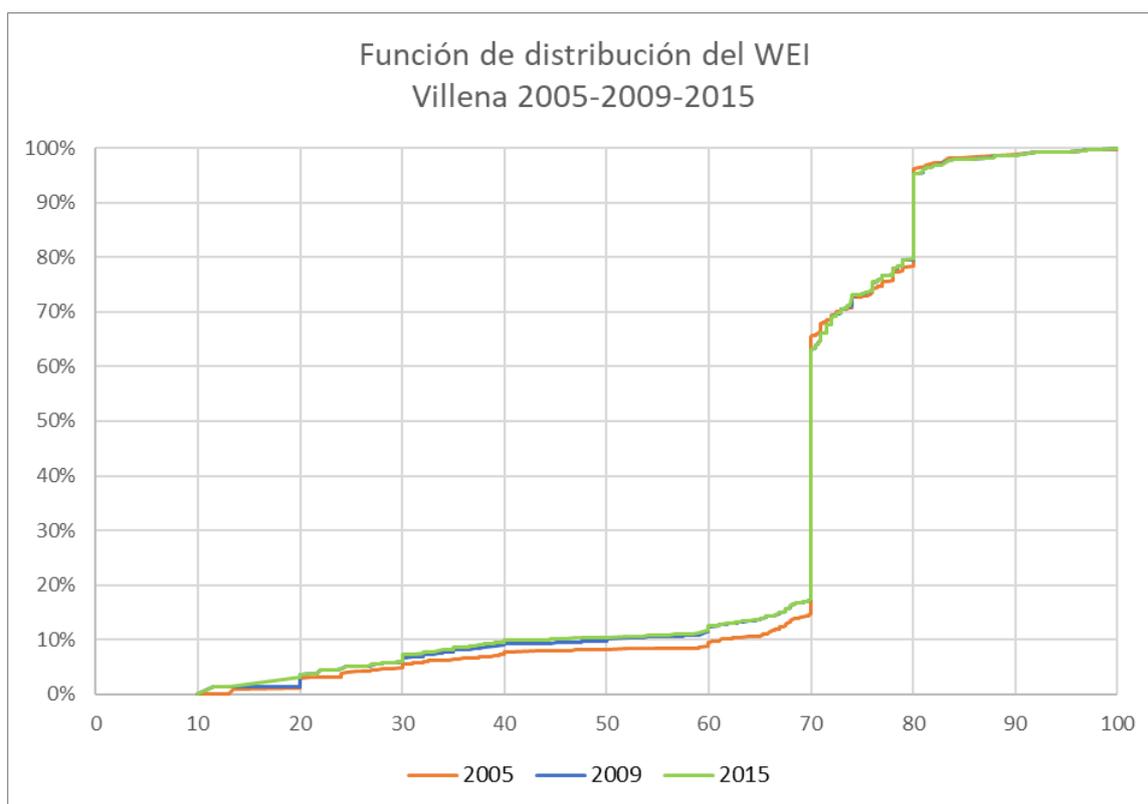


Figura 5.20.- Funciones de distribución acumulada del WEI. Vertedero de Villena

La tabla 5.6 muestra las diferencias entre cada uno de los deciles para cada año.

Tabla 5.6.- Diferencias entre los deciles de la función de distribución. Vertedero de Villena

WEI	Superficie de clase (%)			Diferencias (%)		
	2005	2009	2015	2009-2005	2015-2009	2015-2005
[0,10[	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
[10,20[	1,04%	1,32%	1,32%	0,28%	0,00%	0,28%
[20,30[	3,72%	4,58%	4,60%	0,86%	0,02%	0,88%
[30,40[	2,47%	2,95%	3,56%	0,48%	0,61%	1,09%
[40,50[	1,02%	0,87%	0,97%	-0,15%	0,10%	-0,05%
[50,60[	0,34%	1,67%	1,19%	1,33%	-0,48%	0,85%
[60,70[	6,04%	5,79%	5,62%	-0,25%	-0,17%	-0,42%
[70,80[	63,62%	62,31%	62,26%	-1,31%	-0,06%	-1,36%
[80,90[	20,40%	19,13%	19,12%	-1,26%	-0,02%	-1,28%
[90,100]	1,34%	1,37%	1,37%	0,03%	0,00%	0,03%

Las figuras 5.21 a 5.24 muestran de forma gráfica los resultados de la tabla 5.6.

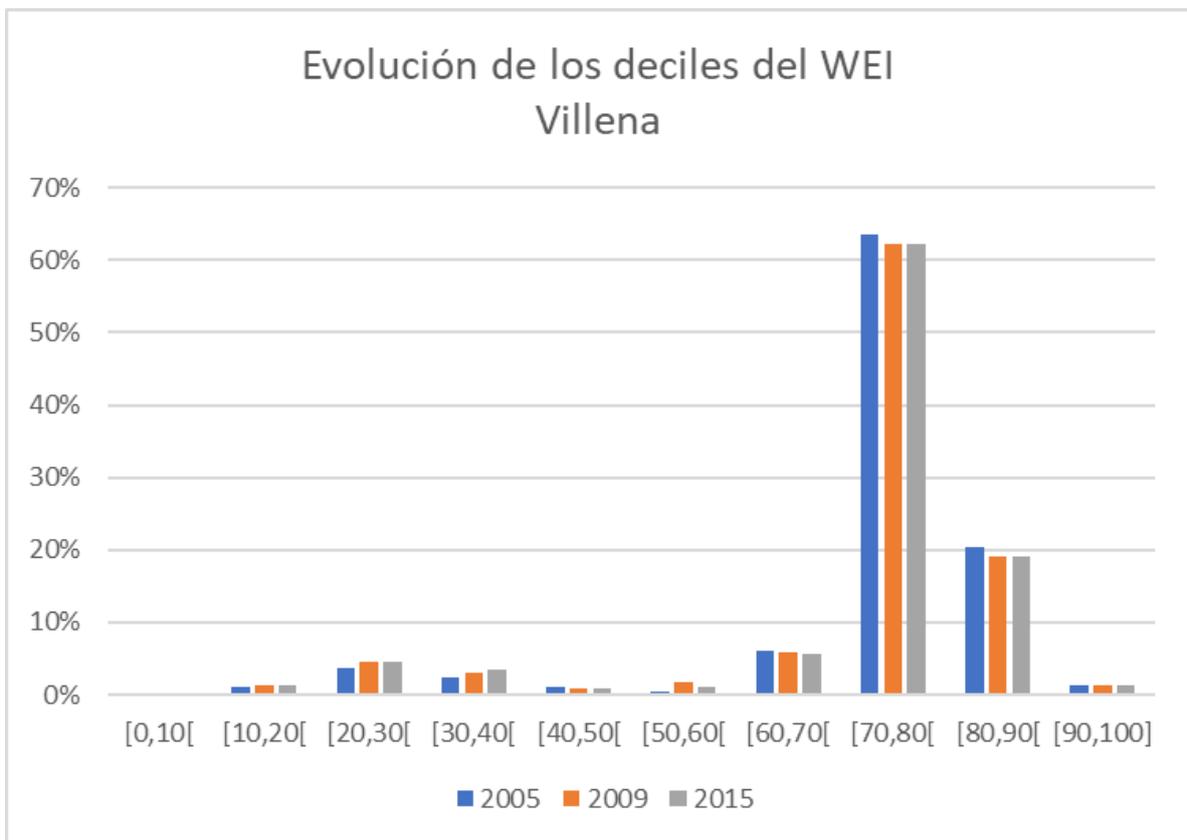


Figura 5.21.- Evolución de los deciles del WEI. Vertedero de Villena

En la figura 5.21 se puede observar que el máximo valor para cada uno de los años siempre se obtiene para la clase [70,80[, situándose en los tres años en valores superiores al 60%. En este caso, a diferencia del anterior, el último decil [90,100] apenas se encuentra representado, siendo el que menor superficie agrupa (sin tener en cuenta el primer decil).

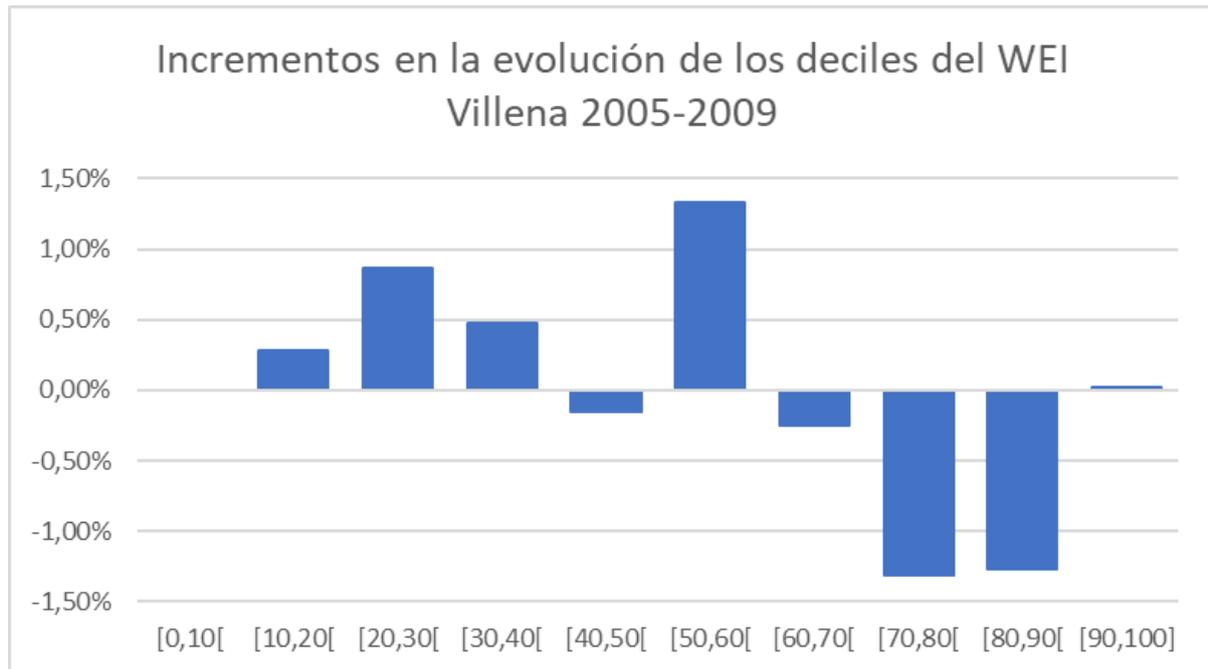


Figura 5.22.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2005-2009. Vertedero de Villena

En la figura 5.22 se observa una disminución de los deciles [70,80[ y [80,90[, que conduce a una disminución del valor global del WEI, ya que la mayor parte de esta pérdida de valor en deciles superiores se traslada a deciles inferiores, principalmente a los deciles [20,30[ y [50,60[. El decil superior presenta una mejora apenas perceptible.

En la figura 5.23 se comprueba como disminuyen los deciles [50,60[ y [60,70[ de forma notable y, dirigiéndose esta pérdida del valor del WEI hacia el decil inferior [30,40[, provocando la caída del valor ambiental hasta un valor de 68,08.

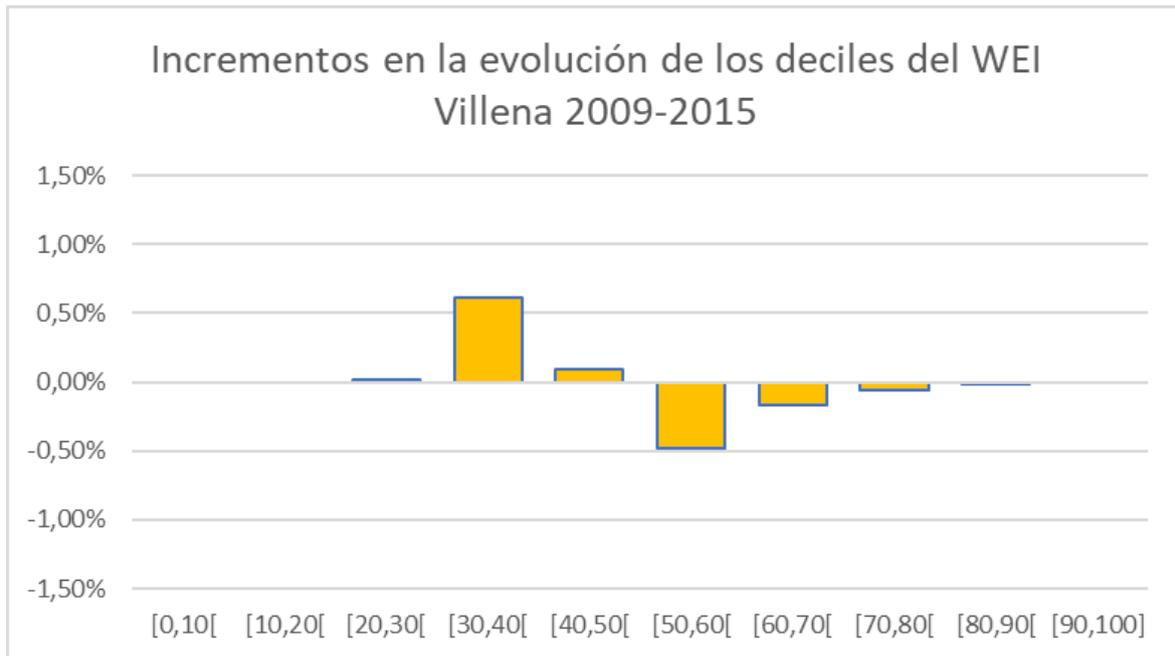


Figura 5.23.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Villena

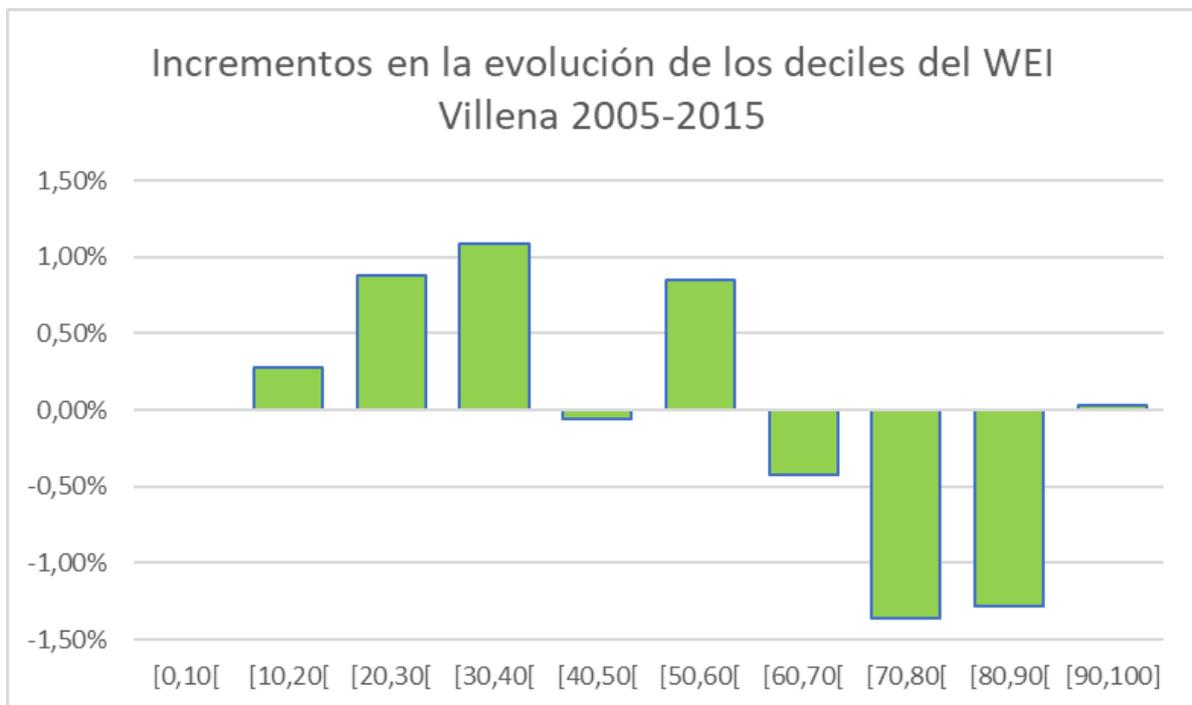


Figura 5.24.- Incrementos en la evolución de los deciles del WEI en 2009-2015. Vertedero de Algimia de Alfará

La figura 5.24 muestra la variación total de los incrementos de los deciles en el periodo estudiado, observando como hay una disminución en los deciles [70,80[ y [80,90[, recogida mayoritariamente en deciles inferiores.

## **6. CONCLUSIONES**

Los indicadores ambientales proporcionan información a partir de la síntesis de datos procedentes de múltiples fuentes. Una de las fuentes con mayor potencial son las bases de datos basadas en técnicas de análisis espacial, mediante GIS, que pueden recopilar datos a partir de la interpretación de imágenes de satélite y transformarlas en información útil para apoyar en la toma de decisiones, para lo cual es necesario procesar toda esa información.

En este trabajo se ha aplicado un nuevo Índice Ambiental Ponderado (WEI) basado en técnicas de análisis espacial mediante GIS para analizar el estado ambiental a través de la evolución del uso del suelo a lo largo del tiempo. La versatilidad del WEI radica en que el usuario puede definir o modificar los valores de los factores de evaluación ( $F_i$ ), de forma que éstos puedan adecuarse al caso concreto de análisis. La metodología se puede completar con la definición de cada factor de ponderación de uso de suelo específico ( $\beta_{jk}$ ), proporcionando una gran versatilidad para analizar el cambio de uso de suelo a lo largo del tiempo.

El WEI se ha aplicado para analizar su evolución en las proximidades de los vertederos de Algimia de Alfara y Villena en un radio de 5 km. La aplicación del WEI a estos casos de estudio deja de manifiesto que es una herramienta muy útil, apta para ser utilizada en análisis tanto a escala regional, como la efectuada en la Comunidad Valenciana en [91], como local, tal cual se ha dejado de manifiesto en el presente estudio.

De esta forma se puede analizar el cambio de uso del suelo a lo largo del tiempo con dos ventajas fundamentales sobre otros índices ambientales. En primer lugar, el WEI se construye a partir de datos oficiales actualizados periódicamente, evitando de esta forma la subjetividad. En segundo lugar, el WEI se puede aplicar al análisis del cambio de uso del suelo a diferentes escalas y su aplicación permite realizar análisis y comparaciones.

La aplicación de WEI permite la realización de análisis estadísticos detallados, que conducen a conclusiones clave sobre los cambios de uso del suelo dentro del área de estudio y sus implicaciones ambientales, cuantificando y analizando tendencias de calidad ambiental.

La utilidad del WEI quedará más de manifiesto si cabe cuanto mayor sea el periodo de análisis analizado. En este caso, únicamente se analiza la evolución a lo largo de 10 años. Conforme vaya aumentando la disponibilidad de datos en SIOSE, mayor perspectiva tendrá el análisis y más confiables serán los resultados obtenidos por el mismo.

En relación con la aplicación del WEI en las proximidades de los vertederos de residuos sólidos urbanos analizados, se ha observado una variación negativa en el valor del WEI en el periodo de análisis (10 años). A partir de estos resultados, es necesario realizar ahora un estudio más detallado de aquellos polígonos cuyo uso del suelo ha cambiado para obtener más información acerca de si es realmente el vertedero el causante de ese cambio y pérdida ambiental o ha venido provocado por factores ajenos a esta infraestructura de residuos.



## **7. LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN**

Existen varias líneas de investigación que se podrían tener en cuenta para futuras aplicaciones del WEI:

- En este trabajo se ha obtenido la información de la base de datos del SIOSE en España. En otros países no tienen implementada una base de datos con este nivel de detalle, por lo que sería interesante aplicar el WEI en regiones fuera de España utilizando sus correspondientes bases de datos nacionales
- La base de datos Corine Land Cover está extendida por todo el mundo. Un estudio interesante sería realizar una aplicación del WEI utilizando ambas fuentes de información (SIOSE y Corine) para comparar los resultados obtenidos y comprobar la bondad de la utilización de una base de datos a menor resolución, como es Corine Land Cover.
- Los valores de  $F_i$  y  $\alpha_i$  deben ser decididos por el modelador, a partir de su conocimiento experto y considerando el asesoramiento local. También se puede seguir la metodología utilizada por índices ambientales anteriores y más simples identificados en la literatura científica. Seleccionar y justificar estratégicamente los valores apropiados de los factores y pesos de evaluación nos permitiría utilizar el WEI tanto para un cribado general y rápido como para una evaluación precisa y en profundidad. Sería interesante realizar el estudio de este trabajo, realizando un análisis de sensibilidad a los valores anteriores, para poder analizar la robustez de los resultados.



## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] U. Heink y I. Kowarik, «What are indicators? on the definition of indicators in ecology and environmental planning», *Ecol. Indic.*, vol. 10, pp. 584-593, 2010.
- [2] A. C. Gurgel, J. Reilly, y E. Blanc, «Agriculture and forest land use change in the continental United States: Are there tipping points?», *iScience*, 2021.
- [3] A. A. Hezri y M. N. Hasan, «Management framework for sustainable development indicators in the State of Selangor, Malaysia», *Ecol. Indic.*, vol. 4, pp. 287-304, 2004.
- [4] P. M. Jackson, «Governance by numbers: what have we learned over the past 30 years?», *Public Money Manag.*, vol. 31, pp. 13-26, 2011.
- [5] C. Hood, «Public service management by numbers: Why does it vary? Where has it come from? What are the gaps and the puzzles?», *Public Money Manag.*, vol. 27, pp. 95-102, 2007.
- [6] E. M. Turnhout, «The effectiveness of boundary objects: the case of ecological indicators», *Sci. Public Policy*, vol. 36, pp. 403-412, 2009.
- [7] B. Godin, «The emergence of S&T indicators: why did governments supplement statistics with indicators?», *Res. Policy*, vol. 32, pp. 679-691, 2003.
- [8] S. Morse y S. Bell, «Sustainable development indicators: the tyranny of methodology revisited», *Cons. J. Sustain. Dev.*, vol. 6, pp. 222-239, 2011.
- [9] C. W. Cobb y C. Rixford, *Lessons Learned from the History of Social Indicators*. San Francisco: Redefining Progress, 1998.
- [10] A. A. Hezri, «Connecting Sustainability Indicators to Policy Systems», Ph.D. Thesis, Australian National University, 2006.
- [11] OECD, «Environmental Indicators: A Preliminary Set», Paris, 1991.
- [12] L. Sébastien y T. Bauler, «Use and influence of composite indicators for sustainable development at the EU-level», *Ecol. Indic.*, vol. 35, pp. 3-12, 2013.
- [13] C. Seaford, «The Multiple Uses of Subjective Well-Being Indicators», *Soc. Indic. Res.*, vol. 114, n.º 1, 2013.
- [14] L. Chevalier, R. Choiniere, y L. Bernier, «User guide to 40 Community Health Indicators», Ottawa, 1992.
- [15] W. Ott, *Environmental Indices: Theory and Practise*. Michigan: Ann Arbor Science, 1978.
- [16] D. Tunstall, «Developing environmental indicators: definitions, framework and issues. Background materials for the World Resources Institute», en *Workshop on Global Environmental Indicators*, 1992.
- [17] A. Hammond, A. Adriaanse, E. Rodenburg, D. Bryant, y R. Woodward, «Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development», Washington, D. C., 1995.

- [18] G. C. Gallopín, «Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A system approach», *Environ. Model. Assess.*, vol. 1, n.º 3, pp. 101-117, 1996.
- [19] H. Bossel, «Indicators for Sustainable Development Theory, Method, Applications», Winnipeg, 1999.
- [20] OECD, «Environmental Indicators: Towards Sustainable Development», Paris, 2001.
- [21] A. R. Schuschny y H. Soto, «Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible», New York, 2009.
- [22] A. Saltelli y S. Tarantola, «On the Relative Importance of Input Factors in Mathematical Models: Safety Assessment for Nuclear Waste Disposal», *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 97, pp. 702-709, 2002.
- [23] AEMA, «Conjunto básico de indicadores de la AEMA», 2006.
- [24] I. Aguado Moralejo, J. Barrutia Legarreta, y C. Echebarría Miguel, «Indicadores de desarrollo humano sostenible: análisis comparativo de la experiencia española», *Ciudad y Territ. Estud. Territ.*, vol. 40, n.º 155, pp. 41-57, 2008.
- [25] R. Bauer, *Social Indicators*. Cambridge: MIT Press, 1996.
- [26] DNP, «Guía para la construcción y análisis de indicadores», Bogotá, 2018.
- [27] D. Meadows, «Indicators and Information Systems for Sustainable Development», Hartland, 1998.
- [28] MMA, «Indicadores ambientales. Una propuesta para España», Madrid, 1996.
- [29] DANE, «Guía para Diseño, Construcción e Interpretación de Indicadores», Bogotá, 2005.
- [30] J. C. Simón Zarzoso, R. García Moral, G. del Barrio Escribano, A. Ruiz Moreno, S. Márquez Barraso, y M. E. Sanjuán Martínez, «Diseño de una metodología para la aplicación de indicadores del estado de conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España», Madrid, 2013.
- [31] M. del C. Bas Cerdá, «Estrategias metodológicas para la construcción de indicadores compuestos en la gestión universitaria», Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de València, 2014.
- [32] J. M. Castro, «Indicadores de desarrollo sostenible urbano. Una aplicación para Andalucía», Sevilla, 2004.
- [33] M. Sánchez Rivero y J. I. Pulido Fernández, «Medida de la sostenibilidad turística. Propuesta de un índice sintético», Madrid, 2008.
- [34] M. Nardo, M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola, A. Hoffman, y E. Giovannini, «Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide», Paris, 2008.
- [35] A. Brambila y P. Flombaum, «Comparison of environmental indicator sets using a unified indicator classification framework», *Ecol. Indic.*, vol. 83, pp. 96-102, 2017.

- [36] M. Saisana y S. Tarantola, «State-of-the-art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development», Ispra, 2002.
- [37] European Commission - DG ECFIN, «Business Climate Indicator for the Euro Area», 2000.
- [38] European Commission - DG ECFIN, «Economic Sentiment Indicator», 2004.
- [39] European Commission - DG ENTR, «European Innovation Scoreboard 2001», Luxembourg, 2001.
- [40] United Nations Development Programme, «Human Development Report 2001 - Making new technologies work for human development», New York, 2001.
- [41] M. Nardo *et al.*, «The e-business readiness composite indicator for 2003: a pilot study», 2004.
- [42] A. Roca Zamora, «How is Internal Market Integration Performing? Trade and Foreign Direct Investment Indicators for Monitoring the State of the Economic Integration», 2009.
- [43] P. Annoni y K. Kozovska, «EU Regional Competitiveness Index 2010», 2010.
- [44] Joint Research Centre, «An information server on composite indicators and ranking systems», <https://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/>, 2020. .
- [45] M. Nardo, M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola, A. Hoffman, y E. Giovannini, *Handbook on constructing composite indicators*, n.º 03. 2005.
- [46] WCED, *Our Common Future*. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.
- [47] UN, «Report of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro. Volume I. Resolutions Adopted By The Conference. Reprinted as Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development», New York, 1993.
- [48] C. Bockstaller y P. Girardin, «How to validate environmental indicators», *Agric. Syst.*, vol. 76, n.º 2, pp. 639-653, 2003.
- [49] D. Niemeijer y R. S. de Groot, «A conceptual framework for selecting environmental indicator sets», *Ecol. Indic.*, vol. 8, n.º 1, pp. 14-25, 2008.
- [50] L. E. Jackson, J. C. Kurtz, y W. S. Fisher, «Evaluation Guidelines for Ecological Indicators», Washington, D. C., 2000.
- [51] V. A. Cloquell-Ballester, V. A. Cloquell-Ballester, R. Monterde-Díaz, y M. C. Santamarina-Siurana, «Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 26, pp. 79-105, 2006.
- [52] D. C. Esty, A. Levy, Marc, C. Kim, A. de Sherbinin, T. Srebotnjak, y V. Mara, «2008 Environmental Performance Index», New Haven, 2008.
- [53] P. Girardin, C. Bockstaller, y H. M. G. van der Werf, «Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems», *J. Sustain. Agric.*, vol. 13, pp. 5-21, 1999.
- [54] EEA, «Environmental Indicators: Typology and Overview», Copenhagen, 1999.

- [55] E. Roca, J. C. Arca, J. Calo, y J. A. Zumalave, «Indicators and systems of environmental monitoring», en *Environmental Information Systems*, La Coruña: Netbiblo, 2005, pp. 95-116 (in Spanish).
- [56] M. Herva, A. Franco, E. Fdez-Carrasco, y E. Roca, «The ecological footprint of production processes as indicator of sustainability», *Ing. Química*, vol. 460, pp. 180-186 (in Spanish), 2008.
- [57] A. Farrow y M. Winograd, «Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America.», *Agric. Ecosyst. Environ.*, pp. 249-268, 2001.
- [58] R. M. Quiroga, *Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas*. CEPAL-Serie Manuales, 2001.
- [59] M. Schomaker, «Development of environmental indicators in UNEP», en *Land Quality Indicators and their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development*, 1997, pp. 35-36.
- [60] National Research Council, *Ecological Indicators for the Nation*. Washington, D. C.: National Academy Press, 2000.
- [61] EEA, «EEA Core Set of Indicators—Guide», Copenhagen, 2005.
- [62] B. Butt, «Environmental indicators and governance», *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 32, pp. 84-89, 2018.
- [63] P. André, C. E. Delisle, y J. P. Revéret, *Environmental Assessment for Sustainable Development: Processes, Actors and Practice*. Montreal: Presses Internationales Polytechniques, 2004.
- [64] PNUD, «Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies», New York, 2007.
- [65] J. Gao, «Comparative Study of sea Experiences Between EU and China: the Use of Indicators», en *Conference on Sustainable Development Evaluation in Europe*, 2010.
- [66] A. Donnelly, M. B. Jones, T. O'Mahony, y G. Byrne, «Selecting Environmental Indicators for Use in Strategic Environmental Assessment», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 27, pp. 161-175, 2006.
- [67] T. Gómez-Navarro, M. García-Melón, S. Acuña-Dutra, y D. Díaz-Martín, «An Environmental Pressure Index Proposal for Urban Development Planning Based on the Analytic Process», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 29, pp. 319-329, 2009.
- [68] M. Perevochtchikova, «La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales», *Gestión y política pública*, vol. 22, n.º 2, 2013.
- [69] D. Gómez Orea, *Evaluación del impacto ambiental: Un instrumento preventivo para la gestión ambiental*. Madrid: Mundi Prensa, 2003.
- [70] M. A. Aguirre Royuela, «Los sistemas de indicadores ambientales y su papel en la información e integración del medio ambiente», en *I Congreso de Ingeniería Civil*,

*Territorio y Medio Ambiente*, 2002.

- [71] M. L. Rodríguez Gamiño, J. López Blanco, y G. Vela Correa, «Indicadores ambientales biofísicos a escala detallada para la planeación territorial en Milpa Alta, Centro de México», *Investig. Geográficas, Boletín del Inst. Geogr.*, vol. 2013, n.º 80, pp. 21-35, 2013.
- [72] AEMA, *Europe's Environment: the Second Assessment*. Elsevier Science, 1998.
- [73] AEMA, «Towards a European Menu of Environmental Headline Indicators. A EEA proposal», 1999.
- [74] A. Adriaanse, *Environmental Policy Performance Indicators. A Study of the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands*. La Haya: SDU Publishers, 1993.
- [75] S. N. Chakrabarty, «Better composite environmental performance index», *Interdiscip. Environ. Rev.*, vol. 19, n.º 2, pp. 139-152, 2018.
- [76] A. Hsu y et al., «2016 Environmental Performance Index», New Haven, 2016.
- [77] U. SOPAC, «Environmental Vulnerability Index: Description of Indicators», 2004.
- [78] World Wildlife Foundation, «The Living Planet Report 2012 Biodiversity, Biocapacity and Better Choices», 2012.
- [79] E. Lazarus *et al.*, «Working Guidebook to the National Footprint Accounts», 2014.
- [80] J. S. Rawat y M. Kumar, «Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India», *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, vol. 18, n.º 1, pp. 77-84, 2015.
- [81] P. M. Treitz, P. J. Howarth, y Peng Gong, «Application of Satellite and GIS Technologies for Land-Cover and Land-Use Mapping at the Rural-Urban Fringe: A Case Study», *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 58, n.º 4, pp. 439-448, 1992.
- [82] I. . Cantarino Martí, «Elaboración y validación de un modelo jerárquico derivado de SIOSE», *Rev. Teledetección*, vol. 39, pp. 5-21, 1988.
- [83] Equipo Técnico Nacional SIOSE, «Descripción del modelo de datos SIOSE - Versión 2», Madrid, 2015.
- [84] IGN, «Sistema Español de Información de Ocupación de Suelo en España», 2005.
- [85] L. Benini, V. Bandini, D. Marazza, y A. Contin, «Assessment of land use changes through an indicator-based approach: A case study from the Lamone river basin in Northern Italy», *Ecol. Indic.*, vol. 10, n.º 1, pp. 4-14, 2010.
- [86] S. López, M. F. López-Sandoval, A. Gerique, y J. Salazar, «Landscape change in Southern Ecuador: An indicator-based and multi-temporal evaluation of land use and land cover in a mixed-use protected area», *Ecol. Indic.*, vol. 115, n.º January 2019, p. 106357, 2020.
- [87] R. F. Bicudo da Silva, J. D. A. Millington, E. F. Moran, M. Batistella, y J. Liu, «Three decades of land-use and land-cover change in mountain regions of the Brazilian Atlantic Forest», *Landsc. Urban Plan.*, vol. 204, n.º September, p. 103948, 2020.

- [88] W. A. Martínez-Dueñas, «INRA - Índice integrado relativo de antropización: propuesta técnica-conceptual y aplicación», *Rev. del Inst. Investig. Trop.*, vol. 5, pp. 45-54, 2010.
- [89] S. Velázquez Salazar, H. L. Landeros Valderrama, M. T. Zúñiga Rodríguez, y M. I. López Cruz, «Anthropization in the coastal zone associated with Mexican mangroves (2005 – 2015)», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, 2019.
- [90] D. de la Rosa y C. A. van Diepen, «Qualitative and quantitative land evaluations», en *Land Use and Land Cover, in Encyclopedia of Life Support System (EOLSS-UNESCO)*, Oxford: Eolss Publishers, 2002.
- [91] J. Rodrigo-Illarri, C. P. Romero-Hernández, y M. E. Rodrigo-Clavero, «Land use/land cover assessment over time using a new weighted environmental index (WEI) based on an object-oriented model and GIS data», *Sustainability*, vol. 12, n.º 24, 2020.
- [92] J. K. Levy, K. W. Hipel, y D. M. Kilgour, «Using environmental indicators to quantify the robustness of policy alternatives to uncertainty», *Ecol. Modell.*, vol. 130, n.º 1-3, pp. 79-86, 2000.
- [93] A. Król-Badziak, S. H. Pishgar-Komleh, S. Rozakis, y J. Księżak, «Environmental and socio-economic performance of different tillage systems in maize grain production: Application of Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Making», *J. Clean. Prod.*, vol. 278, 2021.
- [94] G. Bartzas y K. Komnitsas, «An integrated multi-criteria analysis for assessing sustainability of agricultural production at regional level», *Inf. Process. Agric.*, vol. 7, n.º 2, pp. 223-232, 2020.
- [95] E. Yadegaridehkordi *et al.*, «Assessment of sustainability indicators for green building manufacturing using fuzzy multi-criteria decision making approach», *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 122905, 2020.
- [96] S. Van Schoubroeck, J. Springael, M. Van Dael, R. Malina, y S. Van Passel, «Sustainability indicators for biobased chemicals: A Delphi study using Multi-Criteria Decision Analysis», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 144, n.º September 2018, pp. 198-208, 2019.
- [97] B. G. Hermann, C. Kroeze, y W. Jawjit, «Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators», *J. Clean. Prod.*, vol. 15, n.º 18, pp. 1787-1796, 2007.
- [98] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero», 2020.
- [99] M. E. Garrido-Vergara, «Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos, adaptación para su informatización utilizando técnicas difusas y su aplicación en vertederos de Andalucía», PhD Thesis, Universidad de Granada, 2008.
- [100] Generalitat Valenciana, «Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana», 2000.
- [101] ESRI, «ArcGIS Desktop», Redlands, 2011.

