

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Química

Aplicaciones de la observación satelital terrestre en
la Evaluación Ambiental de la industria minera

Autor: María del Carmen Gómez Pariente

Tutor: Prof. Dr. Eladio M. Romero González

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Química

Aplicaciones de la observación satelital terrestre en la Evaluación Ambiental de la industria minera

Autor:

María del Carmen Gómez Pariente

Tutor:

Prof. Dr. Eladio M. Romero González

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Aplicaciones de la observación satelital terrestre en la Evaluación Ambiental de la industria minera

Autor: María del Carmen Gómez Pariente

Tutor: Prof. Dr. Eladio M. Romero González

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Para finalizar este Proyecto y cerrar esta etapa, me gustaría agradecer a las personas que lo han hecho posible:

A mi tutor, Eladio Romero, por aceptar desde el principio formar parte de este trabajo, y por toda la ayuda prestada para sacarlo adelante.

A Javier Hidalgo, por darme la oportunidad de formar parte de la familia de Medio Ambiente de INERCO, y por confiar en mi para llevar a cabo esta tarea.

Por último, a mi familia, por ser mi apoyo incondicional, especialmente a mi abuelo Juan, para que su compromiso, su fuerza y su espíritu me acompañen siempre.

Mari Carmen Gómez Pariente

Sevilla, 2019

Resumen

La principal motivación que lleva a la realización del presente Proyecto es la de analizar los condicionantes para el cumplimiento de la evaluación de impacto ambiental de actividades industriales. A partir de ahí, estudiar la posibilidad de implantar nuevas técnicas que refuercen los planes de monitorización convencionales, en el marco de un desarrollo sostenible, ayudando así a conseguir los objetivos marcados por la normativa vigente en materia de gestión ambiental.

En este contexto, debido al amplio grado de alcance que ostenta la evaluación ambiental en la industria, se ha optado por particularizar dicho estudio a un ámbito concreto de aplicación. Así, dada la complejidad que conlleva la problemática de la contaminación hídrica por a Drenajes ácidos de mina a nivel mundial, se ha optado por estudiar la posibilidad de incorporar técnicas emergentes de Teledetección para el control de la calidad de las aguas, como método complementario a los métodos convencionales, proponiendo un plan de monitorización alternativo a los actualmente implementados.

Abstract

The aim of this Project is to analyze the determining factors for the fulfillment of the Environmental Impact Assessment of industrial activities. From there, study the possibility of implementing new techniques to enhance the standard monitoring plans, within the framework of sustainable development, helping to achieve the targets set by current environmental management regulations.

In this context, due to the wide scope of the environmental assessment in the industry, it has been decided to particularize this work to a specific sector. Thus, given the complexity of the problem of water pollution due to Acid Mine Drainage (AMD) around the world, it has been decided to study the possibility of incorporating Remote Sensing technologies to control water quality, as a complementary technique to conventional methods, proposing an alternative monitoring plan to those currently implemented.

Índice

Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
1 Introducción y objetivos	1
2 Contextualización normativa	4
2.1 <i>Evaluación Ambiental de Planes, Programas y Proyectos</i>	4
2.1.1 Objeto y ámbito de aplicación	6
2.1.2 Determinación del órgano sustantivo y ambiental	8
2.1.3 Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental ordinaria	8
2.2 <i>Autorización Ambiental Integrada (AAI)</i>	14
2.2.1 Objeto y ámbito de aplicación	15
2.2.2 Solicitud de Autorización Ambiental Integrada	17
2.2.3 Coordinación con el procedimiento de EIA	21
2.3 <i>Autorización Ambiental Unificada (AAU)</i>	23
2.3.1 Objeto y ámbito de aplicación	23
2.3.2 Procedimiento de solicitud de la AAU	24
2.4 <i>Estado y calidad de las aguas superficiales</i>	28
2.4.1 Tipos de vertido	29
2.4.2 Autorización de vertido	32
2.4.3 Seguimiento y evaluación de la calidad de las aguas superficiales	33
2.5 <i>Condiciones requeridos para el cumplimiento de la Evaluación de Impacto Ambiental de actividades mineras</i>	41
2.6 <i>Factores limitantes en el cumplimiento normativo y problemática asociada</i>	44
3 Técnicas de observación satelital terrestre	49
3.1 <i>Concepto de Teledetección</i>	49
3.2 <i>Principios de la Teledetección</i>	50
3.2.1 El espectro electromagnético	50
3.2.2 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera	52
3.2.3 Interacción de la radiación electromagnética con los objetos presentes en la superficie terrestre	53
3.3 <i>Componentes de un Sistema de Teledetección</i>	55
3.4 <i>Clasificación de los sistemas de Teledetección</i>	56
3.4.1 Clasificación según la plataforma donde se sitúe el sensor	56
3.4.2 Clasificación según la Fuente de radiación	57

3.4.3	Clasificación según la resolución espacial y espectral del sensor	58
3.5	<i>Análisis y procesamiento de imágenes captadas por sensores de observación satelital</i>	59
3.5.1	Imágenes en bruto	59
3.5.2	Tipos de resoluciones	60
3.5.3	Preprocesamiento de la imagen	61
3.5.4	Interpretación de la imagen	62
3.6	<i>Sensores de Teledetección ambiental para el control de la calidad de las aguas</i>	63
3.6.1	Sensores de observación satelital	63
3.6.2	Sensores aerotransportados	71
4	Limitaciones y condicionantes en el empleo de la ost	74
4.1	<i>Consideraciones para la selección de un determinado sensor</i>	74
4.2	<i>Limitaciones en el empleo de técnicas de Teledetección para la monitorización y control de la calidad de las aguas</i>	75
4.3	<i>Metodología propuesta para la monitorización de la calidad de las aguas</i>	76
5	Propuestas de actuación	79
5.1	<i>Monitorización del potencial del Drenaje Ácido de Mina sobre la cuenca del río Odiel, Huelva</i>	79
5.1.1	Descripción de la zona de estudio	80
5.1.2	Influencia del clima en la geoquímica del Drenaje Ácido de Mina	81
5.2	<i>Observación satelital de la evolución de lagos contaminados por aguas ácidas de mina en el distrito de Çan (Çanakkale, Turquía)</i>	94
5.2.1	Descripción de la zona de estudio	94
5.2.2	Adquisición de datos	95
5.2.3	Procedimiento empleado	95
5.2.4	Resultados obtenidos	95
5.2.5	Conclusiones	99
5.3	<i>Detección de residuos mineros y Drenaje Ácido de Mina utilizando imágenes captadas por el satélite Worldview-3 en la región de Sulitjelma (Noruega)</i>	100
5.3.1	Descripción de la zona de estudio	100
5.3.2	Adquisición de datos	101
5.3.3	Metodología empleada	101
5.3.4	Resultados obtenidos	102
5.3.5	Conclusiones	103
5.4	<i>Monitorización del Drenaje Ácido de Mina utilizando imágenes hiperespectrales captadas por un sensor a bordo de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) en el distrito de Sokolov (República Checa)</i>	104
5.4.1	Descripción de la zona de estudio	104
5.4.2	Adquisición de datos	105
5.4.3	Metodología empleada	106
5.4.4	Resultados obtenidos	106
5.4.5	Conclusiones	108
6	Conclusiones	110
	Referencias	114
	Conceptos y definiciones	122
	Glosario	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Competencias en cuanto a autorizaciones de vertidos a DPH (Fuente: Elaboración propia/ MITECO)	30
Tabla 2–2. Tipos de demarcaciones hidrográficas (Fuente: Elaboración propia [32])	31
Tabla 2–3. Frecuencias anuales del Programa de Control de Vigilancia (Fuente: Elaboración propia [28])	36
Tabla 2–4. Frecuencias de muestreo del Programa de Control Operativo (Fuente: Elaboración propia [28])	38
Tabla 2–5. Requerimientos para cumplir con las exigencias de la EIA (Fuente: Elaboración propia [38] [39])	42
Tabla 2–6. Requerimientos para cumplir con las exigencias de la EIA (CONT.)	43
Tabla 3–1. Comparativa de satélites para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (Fuente: Elaboración propia [40])	69
Tabla 3–2. Comparativa de satélites para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (CONT.)	70
Tabla 3–3. Comparativa de sensores a bordo de VAT para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (Fuente: Elaboración propia [40])	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Procedimientos de Evaluación ambiental (Fuente: Elaboración propia [9])	5
Figura 2-2. Valoración de la naturaleza de una modificación (Fuente: Elaboración propia [21])	17
Figura 2-3. Procedimiento integrado de solicitud de Autorización Ambiental Integrada (Fuente: Elaboración propia [22])	22
Figura 2-4. Mapa del reparto competencial en materia de vertidos al DPH (Fuente: MITECO)	32
Figura 3-1. Relación entre la temperatura y la intensidad de radiación emitida [38].	51
Figura 3-2. Esquema del espectro electromagnético y su relación con longitudes de onda y frecuencia [38].	51
Figura 3-3. Evolución de la transmisión de energía a través de la atmósfera de diferentes parámetros con respecto a las longitudes de onda del espectro electromagnético [38].	53
Figura 3-4. Curvas de reflectancia espectral de diferentes elementos situados sobre la corteza terrestre [38].	54
Figura 3-5. Esquema representativo de un Sistema de observación global mediante Teledetección [76]	55
Figura 3-6. Sensores pasivos (a) y sensores activos (b) [38].	57
Figura 3-7. Obtención de la matriz con los niveles digitales (DN) a partir de la imagen en bruto [38].	59
Figura 4-1. Procedimiento propuesto para predecir y estimar las variables de calidad de las aguas mediante una combinación entre técnicas de observación satelital y métodos convencionales (Fuente: elaboración propia [40])	77
Figura 5-1. Ubicación de la zona de estudio (Complejo minero Sotiel-Migollas) sobre la cuenca del río Odiel (Huelva) [86]	80
Figura 5-2. Secuencia de algoritmos utilizados para el procesado de imágenes capturadas por el sensor HyMap [86].	83
Figura 5-3. Mapa de las costras precipitadas sobre sedimentos fluviales (diagnosticados mineralógicamente mediante espectroteca de referencia) en las escombreras de las minas en el curso medio (mina Sotiel) del río Odiel (Huelva), para los años 2005 (A), 2008 (B) y 2009 (C) [86].	84
Figura 5-4. Secuencia de procesado de imagen hiperespectral para la obtención de un mapa de aguas ácidas contaminadas [87].	87
Figura 5-5. Escenas correspondientes a la secuencia de procesado de imagen hiperespectral para la obtención de un mapa de contaminación de aguas ácidas por drenaje ácido de mina en el río Odiel (Huelva) [87].	88
Figura 5-6. Mapas de evolución de la contaminación a lo largo del río Odiel (Huelva) (izq.). Mapas de temperatura y precipitación en España para los años 2008 y 2009 (dcha.) [87].	90
Figura 5-7. Mapas del entorno del río correspondiente con el sitio minero: (a) Imagen en falso color; (b)-(d) mapas de agua para los años 2005, 2008 y 2009 (abajo). Mapa de España temperaturas y precipitaciones en 2005, 2008 y 2009 (arriba) [87].	91
Figura 5-8. Mosaico con los vuelos cubiertos por el sensor HyMap sobre la cuenca del río Odiel en 2008. (A)-	

(H): Espectros medidos en campo en los diferentes puntos de medida (a)-(h) [87].	92
Figura 5-9. Situación geográfica de la región de estudio [92].	94
Figura 5-10. Imágenes captadas por sensores satelitales para la detección de formación y evolución de los AML en Çan (Turquía): (a) 1977; (b) 1985; (c) 1987; (d) 1999 [94].	96
Figura 5-11. (Cont.) Imágenes captadas por sensores satelitales para la detección de formación y evolución de los AML en Çan (Turquía): (e) 2003; (f) 2008; (g) 2011; (h) Evolución multitemporal [92].	97
Figura 5-12. Resultados obtenidos de los parámetros de campo analizados en agosto de 2012: (a) pH; (b) Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); (c) Concentraciones de Fe y Al (mg/L) [92].	98
Figura 5-13. Ubicación de la zona de estudio [93]	101
Figura 5-14. Imagen de la zona de estudio captada por el satélite Worldview-3: banda VNIR (arriba); banda SWIR (abajo) [93].	102
Figura 5-15. Localización de la zona de estudio en el distrito de Sokolov [94].	105
Figura 5-16. Respuesta espectral de diferentes elementos seleccionados durante las campañas realizadas sobre Litov. (a)(b) espectros de campo obtenidos mediante espectroradiómetro de campo; (c) (d) respuesta espectral adquirida con cámara hiperespectral a bordo de VANT y en condiciones de laboratorio [94].	107
Figura 5-17. Mapa de distribución de minerales de AMD a lo largo de varios meses aplicando una combinación de diferentes técnicas de clasificación de imágenes hiperespectrales [94].	108

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El ser humano desde su origen siempre ha interactuado, en menor o mayor medida, con el medio ambiente que lo rodea. No obstante, en los últimos tiempos, factores tales como el crecimiento exponencial que ha sufrido la población mundial, así como consiguiente aumento de las necesidades de recursos, han generado importantes impactos sobre el medio ambiente, con consecuencias irreversibles en algunos casos (agotamiento de recursos no renovables, contaminación de recursos hídricos, contaminación atmosférica, generación de gases de efecto invernadero, etc.) [1].

En ese sentido, no fue hasta la década de 1960 cuando se comenzó a tener consciencia del estado de degradación ambiental a nivel global que venía produciéndose en el mundo. Así, la consciencia medioambiental ha ido evolucionando y tomando forma a lo largo de los años, de modo que, la idea inicial predominante durante la década de los años 50 y 60 de que *«contaminar es el precio que hay que pagar para alcanzar el desarrollo»*, fue sustituida por el concepto, introducido en los años 70 y 80, de *«quien contamina paga»*. Posteriormente, en la década de 1990 surgió el enfoque predominante de la prevención de la contaminación [2].

De este modo, el proceso de cambio en las formas de interacción de la sociedad y la naturaleza ha derivado en un pensamiento general basado en el conocimiento, el análisis interdisciplinario de la problemática socioambiental y la preocupación por la preservación de los recursos naturales, que caracteriza a las sociedades modernas [1] [2].

La evolución anteriormente descrita ha ido teniendo lugar por medio de numerosos tratados internacionales, a raíz de los cuales surge concepto de “desarrollo sostenible”. Dichos instrumentos se han ido pronunciando a lo largo del tiempo sobre este principio, definiendo el concepto y alcance que posee, así como las obligaciones que este conlleva [3]. En ese sentido, la Resolución 70/1¹ destaca *«los resultados de todas las grandes conferencias y cumbres de las Naciones Unidas, que han establecido una base sólida para el desarrollo sostenible y han ayudado a conformar la nueva Agenda»*.

Así, la noción de desarrollo sostenible, más allá de las primeras aproximaciones surgidas en los años 60-70, como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano, celebrada en Estocolmo en 1972, fue adoptada e integrada por los países desarrollados desde los años 80-90, a raíz de la publicación del Informe Brundtland, presentada ante la ONU en 1987, como resultado de los trabajos realizados por la Comisión Mundial del Medio Ambiente, y llevada posteriormente a la Conferencia Cumbre de la ONU, sobre desarrollo y medio ambiente celebrada en Río de Janeiro en 1992 [2]. Según dicho Informe, se define el concepto de desarrollo sostenible como *«aquél que garantice las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades»*.

No obstante lo anterior, será a partir de la Declaración del Milenio, formulada por las Naciones Unidas en el año 2000, cuando se aborde el *«carácter sustancial del concepto de desarrollo sostenible»*, por medio de ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM).

Por tanto, en la Cumbre del Milenio se señalan los componentes esenciales del desarrollo en la sociedad internacional y se sientan las bases para que el conjunto de actores internacionales pueda ir incorporando dichos

¹ Resolución 70/1 *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 25 de septiembre de 2015.

objetivos en las preocupaciones políticas, así como en el plano [2].

Posteriormente, en 2015 la Asamblea General de Naciones Unidas adopta, por medio de la Resolución 70/1, *la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, mediante la cual se fijan 17 objetivos de desarrollo sostenible (OSM) y 169 metas. En la Agenda 2030 se desarrolla un modo de actuación que condiciona el comportamiento de los Estados y demás actores que intervienen en la sociedad internacional a lo largo del siglo XXI.

De este modo, los ODS recogen el testigo de los ODM, los cuales abordaban problemas sociales centrados en los países en vías de desarrollo [3], estableciendo en su lugar metas para todos los países, en los tres ámbitos del desarrollo sostenible: social, económico y ambiental.

En definitiva, a raíz de la evolución del concepto de desarrollo sostenible destacan dos aspectos fundamentales. Por un lado, el hecho de que es un principio “acumulativo”, puesto que se ha ido enriqueciendo de componentes políticos, sociales y normativos. Por otro, se trata de un principio “dependiente”, puesto que carece de autonomía en muchos ámbitos, siendo necesaria la presencia de principios simultáneos de regulación de carácter internacional de las diferentes materias de aplicación [3] [4].

Así, asegurar la obtención de los recursos necesarios, por medio de actividades humanas, de manera eficiente y sostenible, es decir, cumpliendo con los objetivos económicos, sociales y ambientales, exige incorporar criterios de sostenibilidad en la realización de planes, programas y proyectos para preservar el entorno natural. Este hecho hace indispensable la creación de una herramienta que garantice una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que puedan generarse, así como los mecanismos eficaces de corrección y compensación.

Bajo este marco de actuación nace la evaluación ambiental, entendida como «*un instrumento que acompaña al desarrollo, asegurando que éste sea sostenible e integrador*» [2].

Como se verá posteriormente en el Capítulo 2, se trata de una normativa que regula la Evaluación de Impacto Ambiental de actividades (industrias extractivas, explotaciones agrícolas, centrales térmicas, industrias químicas, etc.) e infraestructuras (aeropuertos, carreteras, ferrocarriles, etc.).

Adicionalmente, la normativa relativa a la prevención y control integrados de la contaminación (Directiva IPPC) establece un procedimiento de autorización para actividades industriales y agrícolas, nuevas o existentes, de forma que se minimicen las emisiones de contaminantes a la atmósfera, a las aguas y a los suelos, así como la generación de residuos, alcanzando un nivel de protección del medio ambiente elevado. Para ello, se requiere del uso de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD o BAT).

A pesar de lo anterior, la aplicación de la citada normativa tiene asociadas una serie de limitaciones que pueden dar lugar al incumplimiento de algunos de los requisitos legales exigidos y, por consiguiente, la invalidación del proyecto, lo cual hace que disminuya considerablemente la efectividad de estos procedimientos. Entre las limitaciones que pueden darse a lo largo del proceso de gestión ambiental se encuentran el incumplimiento de los plazos marcados por la legislación, falta de eficiencia en la preparación de los estudios técnicos de evaluación ambiental, estudios técnicos complementarios que no se adaptan al diseño del proyecto, identificación incorrecta de los impactos o valoración inadecuada de los mismos, así como incumplimientos del plan de vigilancia ambiental.

En ese sentido, el presente Proyecto plantea abordar, desde el punto de vista de la gestión ambiental, los condicionantes y factores limitantes en los actuales planes de monitorización de la calidad ambiental y, a partir de ahí, plantear un posible método complementario que se encuentre a la altura las mejores técnicas disponibles, logrando hacer frente a las limitaciones alcanzándose un elevado nivel de protección ambiental.

Teniendo en cuenta las particularidades de cada una de las actividades sometidas a evaluación de impacto ambiental y autorización ambiental integrada, el objeto de estudio se centrará en un ámbito concreto. En este caso, se han seleccionado las actividades de explotación minera, dada la compleja problemática medioambiental que tienen asociada, con casos recientes en los que se ha revocado la Autorización Ambiental Integrada para un determinado Proyecto de explotación², a causa de factores tales como incumplimiento del periodo de

² El Tribunal Supremo (TS) ha confirmado la sentencia primera de la Sala de lo Contencioso-Administrativo del Tribunal Superior de Justicia de Andalucía (TSJA) que estimó parcialmente la demanda interpuesta por Ecologistas en Acción, declarando nula la resolución de 27 de marzo de 2014, que otorgaba la Autorización Ambiental Unificada (AAU) para el proyecto de explotación del complejo minero de Riotinto, en la provincia de Huelva. (Fuente: <https://www.europapress.es/andalucia/huelva-00354/noticia-ts-confirma-nulidad-autorizacion-ambiental-mina-atalaya-riotinto-minera-20190405102639.html>)

información pública o el incumplimiento de las medidas de las correctoras y planes de vigilancia ambiental.

Como es sabido, los proyectos referentes a actividades de explotación minera son causa de fuertes impactos ambientales, debido a factores tales como los grandes volúmenes de materiales que se requiere, creando huecos y escombreras. Entre dichos impactos se encuentran aspectos como la contaminación atmosférica (emisión de partículas), el ruido, la contaminación hídrica o del suelo y diversas repercusiones en los niveles freáticos, la pérdida de biodiversidad o el impacto visual del paisaje [2].

El alcance del impacto medioambiental depende de la naturaleza del mineral, así como de las características específicas del yacimiento. En cuanto a los factores determinantes de las consecuencias, cabe señalar que, generalmente la extracción de metales suele entrañar un mayor impacto ambiental, debido a la necesidad de emplear sustancias tóxicas para las tareas de separación del mineral. Consecuentemente, la ingente cantidad de residuos generados debe ser gestionada cuidadosamente, para evitar la contaminación del agua como consecuencia de drenajes ácidos, y prevenir rupturas de estructuras y presas de contención de residuos, pudiendo desatar graves impactos ecológicos [2]. Prueba de ello son los accidentes ocurridos a lo largo de los últimos tiempos, como son el desmoronamiento de la presa de residuos mineros de la mina de Aznalcóllar, que provocó el envenenamiento del entorno del Parque Nacional de Doñana; o la rotura del dique de contención de la balsa de estériles de la mina de oro “Baia Mare” (Rumanía), ocasionando una estela tóxica que desembocó en el Danubio.

Asimismo, la gran cantidad de yacimientos abandonados y explotaciones pendientes de rehabilitación, que deterioran el paisaje y suponen una grave amenaza ambiental, especialmente en lo que respecta al drenaje ácido de mina, son muestra del ineficiente rendimiento ambiental que se ha venido sucediendo por parte de la industria. Las deficiencias en el marco jurídico han sido un factor determinante de esta problemática, dando lugar a dificultades a la hora de identificar las partes a las que corresponde la responsabilidad jurídica para la restauración ambiental de dichas explotaciones [2].

En definitiva, a pesar del progreso realizado durante los últimos años en favor de adoptar estrategias de sostenibilidad que garanticen un elevado rendimiento medioambiental, es necesario efectuar nuevas mejoras que se encarguen de disminuir las limitaciones existentes en el proceso de gestión ambiental. Para ello, juega un papel clave la difusión e implantación de las nuevas tecnologías más avanzadas.

No obstante, para que dichas técnicas den resultado, deben ser conjugadas con instrumentos robustos y eficaces que verifiquen el correcto funcionamiento de las medidas adoptadas, que establezcan un control ambiental del entorno donde se produce la actividad, y que logren anticiparse a los posibles impactos generados, siendo determinantes en la toma de decisiones legales por parte de los organismos competentes, para tomar las medidas de mitigación correspondientes.

En ese sentido, la utilización de imágenes tomadas desde satélite para la observación de la cubierta terrestre, conocida con el término de Teledetección, ofrece grandes posibilidades para ser aplicada en la gestión ambiental de la industria minera. Se trata de una técnica que ha ido evolucionando en los últimos años, no estando aun ampliamente implantada en cuanto a este sector se refiere.

Mediante el presente documento, se pretende poner de manifiesto la posibilidad de la Teledetección como herramienta de aplicación en actividades mineras tales como el seguimiento de la evolución de explotaciones, o la monitorización de la calidad de las aguas susceptibles de ser contaminadas por drenaje ácido de mina. Asimismo, se tendrán en cuenta las limitaciones asociadas a ella, llegándose a una serie de conclusiones finales al respecto.

2 CONTEXTUALIZACIÓN NORMATIVA

En este Capítulo se pretende abordar, de forma general, la legislación estatal y autonómica, en materia de autorizaciones ambientales, que es de aplicación a las instalaciones mineras. Así, en el ámbito nacional se tendrá en cuenta la Evaluación Ambiental de Planes, Programas y Proyectos, así como la Autorización Ambiental Integrada. Por su parte, en el ámbito autonómico, se considerará el caso particular de Andalucía, por medio de la Autorización Ambiental Unificada, la cual engloba las dos anteriores disposiciones.

Seguidamente, se llevará a cabo un análisis de la normativa aplicada que desarrolla los planes de monitorización actuales que determinan el estado y calidad de las aguas superficiales, así como los condicionantes asociados al cumplimiento de dichos planes, y la problemática derivada del incumplimiento de los mismos, particularizada para el ámbito de aplicación de la industria minera.

2.1 Evaluación Ambiental de Planes, Programas y Proyectos

En el régimen autorizatorio de los planes, programas y proyectos, que pretendan ser llevados a cabo en el ámbito internacional, quedan incluidos el conjunto de estudios técnicos ambientales, en materia de contaminación atmosférica, acuática, de suelos, gestión de residuos, afección al cambio climático, etc., así como aquellas técnicas y procedimientos aplicables para una correcta evaluación de sus repercusiones sobre el medio ambiente.

En ese sentido, la evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Por un lado, favorece la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas, a través de la evaluación de los planes y programas. Por otro, se encarga de garantizar, por medio de la evaluación de proyectos, una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, proponiendo al mismo tiempo los mecanismos adecuados para su corrección y compensación [5].

En definitiva, se trata de un instrumento plenamente consolidado, que asegura que el desarrollo económico y social sea sostenible e integrador [5].

En el ámbito comunitario ello se traduce en la Directiva 2001/42/CE, de 27 de junio, *relativa a la evaluación de los planes y programas en el medio ambiente* [6], así como la Directiva 2011/92/UE, de 13 de diciembre, *sobre la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente* [7], posteriormente modificada por la Directiva 2014/52/UE [8].

Así, las Directivas anteriormente citadas son integradas en el marco jurídico español por medio de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, *de evaluación ambiental*³, recientemente modificada por la Ley 9/2018, de 5 de diciembre [9] [10]. Por tanto, la citada ley reúne en un único texto el régimen jurídico de la evaluación de planes, programas y proyectos, estableciendo un conjunto de disposiciones comunes que aproximan y facilitan la

³ Esta Ley sustituye a las anteriores disposiciones: la Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente; y el R.D Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos [98] [99].

aplicación de ambas regulaciones. Esta disposición surge como consecuencia de la necesidad de revisar la normativa comunitaria en materia de evaluación ambiental, debido a la necesidad de corregir una serie de disfunciones y carencias técnicas tales como la tardanza en las emisiones de determinadas declaraciones de impacto ambiental, o la diversidad de ciertas normativas.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Ley 21/2013 consigue mejorar la eficiencia de la evaluación ambiental, en tanto en cuanto establece un marco jurídico común a nivel estatal, junto con la normativa de protección adicional que establezca cada Comunidad Autónoma, evitándose en cualquier caso diferencias entre los niveles de exigencia medioambiental de las diferentes Comunidades Autónomas.

Para la Evaluación de Impacto Ambiental (así como para la Evaluación Ambiental Estratégica) se tienen dos procedimientos: el ordinario y el simplificado. Ello es debido a la obligación, por parte de las directivas comunitarias, a realizar una evaluación ambiental con carácter previo a todo plan, programa o proyecto susceptible de *tener efectos adversos sobre el medio ambiente*.

Así, para determinados tipos de planes, programas y proyectos, las directivas establecen la presunción de *iuris et de iure*, de que, en todo caso, tendrán efectos significativos sobre el medio ambiente y, por tanto, han de ser evaluados antes de su aprobación, adopción o autorización, de acuerdo con el procedimiento ordinario [11]. Este será el caso de aquellos proyectos acometidos en instalaciones mineras, objeto del presente Proyecto que, como se verá más adelante, se encuentra recogido en el Anexo I de la Ley 21/2013. Por su parte, los restantes planes, programas y proyectos, deberán ser sometidos a un procedimiento de evaluación simplificado, mediante el cual, si finalmente se concluye que dicho plan, programa o proyecto tiene efectos significativos sobre el medio ambiente, deberá realizarse una evaluación ordinaria.

A continuación, en la Figura 2-1 se resumen los distintos procedimientos a los que pueden someterse los planes, programas y proyectos, de acuerdo con la Ley 21/2013.

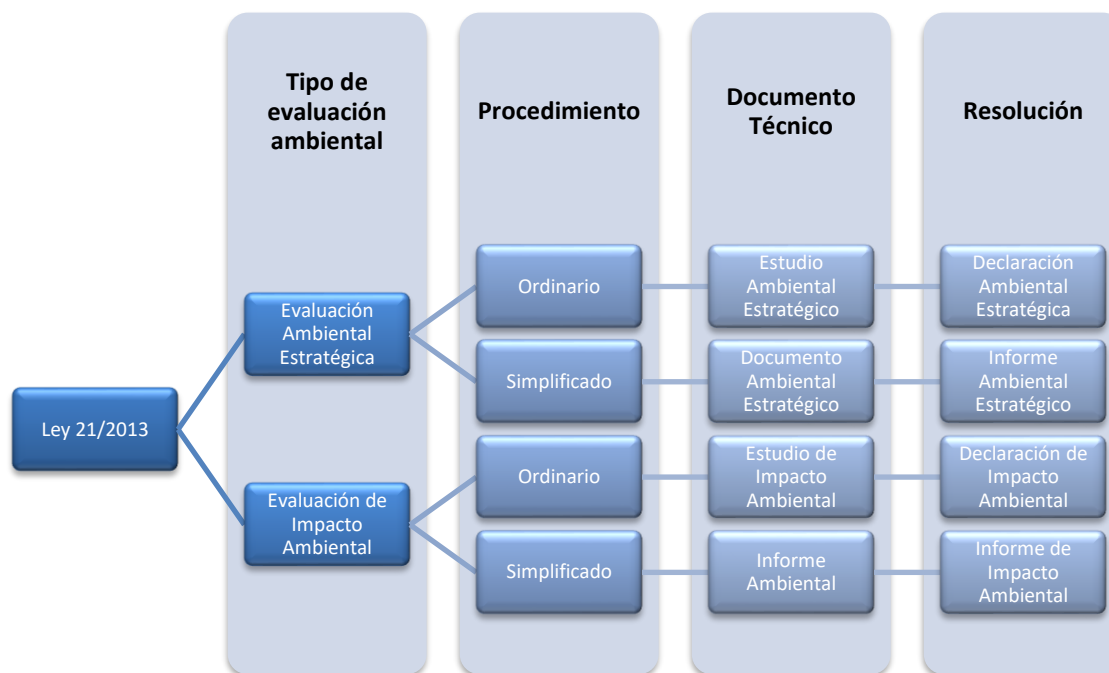


Figura 2-1. Procedimientos de Evaluación ambiental (Fuente: Elaboración propia [9])

El procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental ordinario, el cual será objeto del presente Proyecto, se inicia cuando el órgano sustantivo remite al órgano ambiental el expediente completo, el cual incluye el proyecto, el Estudio de Impacto Ambiental y el resultado de la información pública y de las consultas a las administraciones públicas afectadas y a las personas interesadas.

No obstante lo anterior, deberán realizarse una serie de trámites previamente al procedimiento. Entre ellos se encuentra la determinación del alcance del Estudio de Impacto Ambiental, de carácter voluntario para el

promotor.

Tras ser elaborado el Estudio de Impacto Ambiental, el órgano sustantivo debe establecer obligatoriamente los trámites de información pública y de consultas a las administraciones afectadas y a las personas interesadas.

Asimismo, deberán ser incluidos con carácter preceptivo los siguientes informes:

- Informe del órgano con competencias en materias de medio ambiente de la Comunidad Autónoma donde se encuentre situada la instalación.
- Informe del organismo de cuenca.
- Informe sobre patrimonio cultural.
- Informe sobre dominio público hidráulico, de ser necesario.

De esta forma, la EIA ordinaria se desarrolla en tres fases: inicio, análisis técnico y Declaración de Impacto Ambiental.

Una vez llevado a cabo el análisis técnico del expediente previamente admitido por el organismo competente, el EIA finaliza con la resolución a partir de la cual se formula la Declaración de Impacto Ambiental, informe preceptivo y determinante mediante el cual se determinará si procede o no la realización del proyecto a los efectos ambientales, así como las condiciones ambientales en las que puede desarrollarse, las medidas correctoras de los efectos ambientales negativos y, si proceden, aquellas medidas compensatorias de dichos efectos.

El contenido mínimo de la DIA será publicado en diarios oficiales y en la sede electrónica del órgano ambiental correspondiente.

2.1.1 Objeto y ámbito de aplicación

En la Ley 21/2013, como ha sido comentado con anterioridad, se establecen las bases por las cuales se rige la evaluación ambiental de planes, programas y proyectos que puedan afectar significativamente al medio ambiente, garantizando un nivel de protección ambiental adecuado. Ello se consigue mediante una serie de aspectos, recogidos en el artículo 1 perteneciente al Título I de la citada ley.

«a) La integración de los aspectos medioambientales en la elaboración y en la adopción, aprobación o autorización de los planes, programas y proyectos.

b) el análisis y la selección de las alternativas que resulten ambientalmente viables.

c) el establecimiento de las medidas que permitan prevenir, corregir y, en su caso, compensar los efectos adversos sobre el medio ambiente.

d) el establecimiento de las medidas de vigilancia, seguimiento y sanción necesarias para cumplir con las finalidades de esta ley».

Asimismo, los principios sobre los que se sustenta la evaluación ambiental, de acuerdo con el artículo 2 del Título I, son los siguientes:

- a) Protección y mejora del medio ambiente.*
- b) Precaución y acción cautelar.*
- c) Acción preventiva, corrección y compensación de los impactos sobre el medio ambiente.*
- d) Quien contamina paga.*
- e) Racionalización, simplificación y concertación de los procedimientos de evaluación ambiental.*
- f) Cooperación y coordinación entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas.*
- g) Proporcionalidad entre los efectos sobre el medio ambiente de los planes, programas y proyectos, y el tipo de procedimiento de evaluación al que en su caso deban someterse.*
- h) Colaboración activa de los distintos órganos administrativos que intervienen en el procedimiento de evaluación, facilitando la información necesaria que se les requiera.*
- i) Participación pública.*
- j) Desarrollo sostenible.*
- k) Integración de los aspectos ambientales en la toma de decisiones.*
- l) Actuación de acuerdo al mejor conocimiento científico posible».*

Por su parte, en el artículo 7 de la ley se establece el ámbito de aplicación de la evaluación de impacto ambiental. En ese sentido, en el caso particular de la Industria minera, aquellos proyectos que se pretenda llevar a cabo en instalaciones mineras estarán sometidos a evaluación de impacto ambiental, debido a que se encuentran recogidos en el Anexo I, de Proyectos sometidos a la evaluación ambiental ordinaria:

«Grupo 2. Industria extractiva.

a) Explotaciones y frentes de una misma autorización o concesión a cielo abierto de yacimientos minerales y demás recursos geológicos de las secciones A, B, C y D cuyo aprovechamiento está regulado por la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas y normativa complementaria, cuando se dé alguna de las circunstancias siguientes:

- 1. Explotaciones en las que la superficie de terreno afectado supere las 25 ha.*
- 2. Explotaciones que tengan un movimiento total de tierras superior a 200.000 metros cúbicos anuales.*
- 3. Explotaciones que se realicen por debajo del nivel freático, tomando como nivel de referencia el más elevado entre las oscilaciones anuales, o que pueden suponer una disminución de la recarga de acuíferos superficiales o profundos.*
- 4. Explotaciones de depósitos ligados a la dinámica actual: fluvial, fluvio-glacial, litoral o eólica. Aquellos otros depósitos y turberas que por su contenido en flora fósil puedan tener interés científico para la reconstrucción palinológica y paleoclimática. Extracción de turba, cuando la superficie del terreno de extracción supere las 150 ha.*
- 5. Explotaciones visibles desde autopistas, autovías, carreteras nacionales y comarcales, espacios naturales protegidos, núcleos urbanos superiores a 1.000 habitantes o situadas a distancias inferiores a 2 km de tales núcleos.*
- 6. Explotaciones de sustancias que puedan sufrir alteraciones por oxidación, hidratación, etc., y que induzcan, en límites superiores a los incluidos en las legislaciones vigentes, a acidez, toxicidad u otros*

parámetros en concentraciones tales que supongan riesgo para la salud humana o el medio ambiente, como las menas con sulfuros, explotaciones de combustibles sólidos, explotaciones que requieran tratamiento por lixiviación in situ y minerales radiactivos.

7. Extracciones que, aun no cumpliendo ninguna de las condiciones anteriores, se sitúen a menos de 5 km de los límites del área que se prevea afectar por el laboreo y las instalaciones anexas de cualquier explotación o concesión minera a cielo abierto existente.

b) Minería subterránea en las explotaciones en las que se dé alguna de las circunstancias siguientes:

1.º Que su paragénesis pueda, por oxidación, hidratación o disolución, producir aguas ácidas o alcalinas que den lugar a cambios en el pH o liberen iones metálicos o no metálicos que supongan una alteración del medio natural.

2.º Que exploten minerales radiactivos.

3.º Aquéllas cuyos minados se encuentren a menos de 1 km (medido en plano) de distancia de núcleos urbanos, que puedan inducir riesgos por subsidencia».

2.1.2 Determinación del órgano sustantivo y ambiental

El órgano sustantivo es aquel órgano de la Administración pública estatal, autonómica o local competente para autorizar o aprobar los proyectos que deban ser sometidos a EIA, mientras que el órgano ambiental será aquel órgano de la Administración pública estatal, autonómica o local competente para evaluar el impacto ambiental de dichos proyectos [5].

En el caso de aquellos proyectos o actuaciones que pretendan acometerse en instalaciones mineras, el órgano sustantivo corresponde a la Administración autonómica (Secretaría general de industria, energía y minas, en el caso de Andalucía). En consonancia con lo anterior, el órgano ambiental debe ser la Consejería competente de Medio Ambiente correspondiente.

2.1.3 Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental ordinaria

Este procedimiento comienza cuando el órgano ambiental recibe el expediente completo de Evaluación de Impacto Ambiental. Por su parte, las fases en las que puede dividirse el procedimiento se desarrollan a continuación.

2.1.3.1 Actuaciones previas

Con carácter previo al inicio del procedimiento de EIA ordinario, el promotor puede solicitar al órgano ambiental competente la elaboración de un documento de alcance del EIA, siendo el plazo máximo para la realización del mismo de 3 meses.

El promotor debe presentar, en tal caso, la solicitud formal al órgano sustantivo, acompañada del documento inicial del proyecto, el cual debe contener una definición y ubicación del proyecto, una relación de las principales alternativas consideradas, así como los potenciales impactos que ocasionan, y un diagnóstico territorial y del medio ambiente afectado por el proyecto.

Tras ser comprobada la correcta adecuación de la documentación presentada, el órgano sustantivo deberá remitirla al órgano ambiental, para que elabore el documento de alcance del Estudio de Impacto Ambiental, para

lo cual dispondrá de un plazo de 10 días hábiles.

Con carácter previo al inicio, el promotor puede solicitar la elaboración, por parte del órgano ambiental, de un documento de alcance del Estudio de Impacto Ambiental, con un plazo máximo de 3 meses. Ello se realizará por medio de una solicitud formar al órgano sustantivo, acompañada del documento inicial del proyecto, el cual deberá contener la definición características y ubicación del proyecto, aquellas alternativas consideradas, así como los principales impactos ocasionados por cada una de ellas, y un diagnóstico territorial y del medio ambiente afectado por el proyecto.

Una vez comprobada la adecuación de los documentos presentados, el órgano sustantivo la remitirá, en un plazo de diez días hábiles, al órgano ambiental, para que elabore el documento de alcance.

Por su parte, para la elaboración de dicho alcance, el órgano ambiental consultará a las Administraciones públicas afectadas y a personas interesadas, cuyo pronunciamiento deberá realizarse en un plazo máximo de 30 días.

En caso de no haberse recibido dicho pronunciamiento, una vez transcurrido el plazo establecido por la normativa, pueden darse diferentes situaciones:

Si el órgano ambiental cuenta con elementos de juicio suficientes para elaborar el documento de alcance del EIA, el procedimiento seguirá su curso, no teniéndose en cuenta pronunciamientos que se reciban posteriormente.

Asimismo, puede darse el caso de que el órgano ambiental no posea elementos de juicio suficientes, bien porque no haya recibido los informes por parte de las Administraciones públicas competentes, o porque, habiéndolos recibido, resulten insuficientes para tomar una decisión. En tal caso, requerirá personalmente al órgano jerárquico superior de aquel que tendría que emitir el informe, para que, en un plazo de diez días hábiles, ordene al órgano competente la entrega de dicho informe. El requerimiento efectuado será comunicado al órgano sustantivo y al promotor, suspendiéndose el plazo previsto para la elaboración del documento de alcance. En caso de no recibirse el informe transcurrido el plazo establecido, el órgano ambiental lo notificará al promotor, quien podrá continuar con la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental, prosiguiendo la tramitación del procedimiento. En cualquier caso, el promotor puede reclamar a la Administración competente la emisión del informe.

En caso de recibirse las contestaciones a las consultas, el órgano ambiental deberá remitirlas al órgano sustantivo y promotor, junto con el documento de alcance del EIA, dentro del plazo establecido, no siendo preciso realizar nuevas consultas.

2.1.3.2 Estudio de Impacto Ambiental

El promotor elaborará el Estudio de Impacto Ambiental, el cual contendrá, de acuerdo a lo establecido en el artículo 35 de la Ley 21/2013, la siguiente información (desarrollada en el anexo VI de la citada ley).

- a) Descripción general del proyecto (incluyendo información sobre su ubicación, diseño y dimensiones), así como las previsiones en el tiempo sobre la utilización del suelo y de otros recursos naturales. Cuantificación y tipología de residuos generados y emisiones producidas como consecuencia del proyecto.
- b) Descripción de las alternativas estudiadas que tengan relación con el proyecto, y una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos del proyecto sobre el medio ambiente.
- c) Evaluación y, si procede, cuantificación de los posibles efectos significativos directos o indirectos, secundarios, acumulativos y sinérgicos del proyecto sobre la población, la salud humana, la flora, la fauna, la biodiversidad, la geodiversidad, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, el medio marino, el clima, el cambio climático, el paisaje, los bienes materiales, el patrimonio cultural, y la interacción entre dichos vectores, durante las fases de ejecución, explotación y, en su caso, durante la demolición o abandono

del proyecto.

- d) Adicionalmente, en caso de que el proyecto afecte directa o indirectamente a espacios Red Natura 2000, se incluirá un apartado específico para la evaluación de sus repercusiones en el entorno.
- e) Asimismo, si el proyecto es susceptible de causar a largo plazo una modificación hidromorfológica en una masa de agua superficial o una alteración del nivel en una masa de agua subterránea impidiendo que alcance el buen estado, o que pueda suponer un deterioro del mismo, se incluirá un apartado específico para la evaluación de sus repercusiones a largo plazo sobre los elementos de calidad correspondientes.
- f) Se llevará a cabo un análisis de la vulnerabilidad del proyecto ante riesgos de accidentes graves o de catástrofes, sobre el riesgo de que se produzcan dichos accidentes o catástrofes, y sobre los probables efectos adversos significativos sobre el medio ambiente, en caso de ocurrencia de los mismos, o bien informe justificativo sobre la no aplicación de este apartado al proyecto. Este apartado ha sido incorporado por la reciente Ley 9/2018, de 5 de diciembre, *por la que se modifica la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental*.
- g) Medidas que permitan prevenir, corregir y, en su caso, compensar los posibles efectos adversos significativos sobre el medio ambiente y el paisaje.
- h) Programa de vigilancia ambiental. Este apartado será desarrollado en epígrafes posteriores, debido a su relación con el presente Proyecto.
- i) Resumen no técnico del estudio de impacto ambiental y conclusiones extraídas.

2.1.3.3 Información pública y consulta a Administraciones públicas afectadas y a las personas interesadas

Una vez presentado el proyecto y el Estudio de Impacto Ambiental ante el órgano sustantivo serán sometidos a información pública durante un plazo mínimo de 30 días, previo anuncio en el diario oficial correspondiente (y en su sede electrónica).

En esta fase del proyecto estarán abiertas todas las opciones relativas a la determinación del contenido, extensión y definición del proyecto.

En el caso de proyectos que deban ser autorizados por la Administración General del Estado, y que además requieran una Autorización Ambiental Integrada, el órgano sustantivo realizará la información pública. Por otro lado, cuando se trate de proyectos sometidos a declaración responsable o comunicación previa, le corresponderá al órgano ambiental realizar la información pública.

El anuncio del comienzo de la información pública incluirá un resumen del procedimiento de autorización del proyecto, que deberá incluir la indicación de que dicho proyecto está sujeto a EIA ordinaria; una identificación del órgano competente para autorizar el proyecto o, en su caso, al que deba presentarse la correspondiente declaración o comunicación previa, así como los órganos que puedan prestar información pertinente, y aquellos que puedan recibir alegaciones.

De forma simultánea al trámite de información pública, el órgano sustantivo consultará a las Administraciones públicas afectadas, así como a las personas interesadas sobre los posibles efectos significativos del proyecto, incluyendo el análisis de vulnerabilidad del proyecto ante riesgos de accidentes graves o catástrofes que incidan en el mismo. Estos dispondrán de un plazo máximo de 30 días hábiles para emitir los informes y formular alegaciones.

Además, deberá solicitar con carácter preceptivo los siguientes informes [12]:

- Informe del órgano con competencias en materia de medio ambiente de la comunidad autónoma en donde se ubique el proyecto.
- Informe sobre el patrimonio cultural, cuando proceda.
- Informe de los órganos con competencias en materia de planificación hidrológica y de dominio público hidráulico, y en materia de calidad de las aguas, cuando proceda.
- Informe sobre dominio público marítimo-terrestre, y las estrategias marinas cuando proceda.
- Informe preliminar del órgano con competencias en materia de impacto radiológico, cuando proceda.
- Informe de los órganos con competencias en materia de prevención y gestión de riesgos derivados de accidentes graves o catástrofes, en su caso.
- Informe sobre la compatibilidad del proyecto con la planificación hidrológica o de la planificación de la Demarcación marina, cuando proceda.
- Informe del Ministerio de Defensa, en el caso de que el proyecto incida sobre zonas declaradas de interés para la Defensa Nacional y terrenos, edificaciones e instalaciones, incluidas sus zonas de protección, afectos a la Defensa Nacional.
- Informe de los órganos con competencias en materia de salud pública, cuando proceda.

2.1.3.4 Modificación del proyecto o del Estudio de Impacto Ambiental y nuevo trámite de información pública y consultas

En el plazo máximo de treinta días hábiles desde la finalización de los trámites anteriormente expuestos, el órgano sustantivo remitirá al promotor los informes y alegaciones recibidas para su consideración en la redacción del proyecto y Estudio de Impacto Ambiental. Cabe destacar que, si ello supone incorporar modificaciones que supongan efectos ambientales significativos distintos a los previstos originalmente, será necesario realizar un nuevo trámite de información pública y consultas.

2.1.3.5 Evaluación de Impacto Ambiental ordinaria

Dentro del procedimiento sustantivo de autorización del proyecto, el promotor presentará ante el órgano sustantivo, junto con la documentación exigida por la legislación sectorial, una solicitud de evaluación de impacto ambiental ordinaria, acompañada de la siguiente documentación, que constituirá el contenido mínimo del expediente de Evaluación de Impacto Ambiental:

- a) Documento técnico del proyecto.
- b) Estudio de Impacto Ambiental.
- c) Alegaciones e informes recibidos en los trámites de información pública y consultas a Administraciones Públicas afectadas y a las personas interesadas.

Una vez realizada la comprobación de la documentación anterior por parte del órgano sustantivo, la remitirá al órgano ambiental, quien tendrá un plazo de 20 días hábiles para resolver su inadmisión. Con carácter previo deberá notificarlo al promotor, pudiéndose interponerse los recursos legalmente procedentes en vía administrativa y judicial en su caso.

2.1.3.6 Análisis técnico del expediente ambiental

El órgano ambiental realizará un análisis del expediente de Evaluación de Impacto ambiental y comprobará que esté completo.

En caso de faltar algún tipo de la información requerida, información pública o consultas, será requerido el órgano ambiental para subsanar el expediente en un plazo de tres meses. En caso de transcurrir dicho período y permanecer incompleto el expediente de la EIA, el órgano ambiental dará por finalizada la EIA ordinaria, siendo notificada al órgano sustantivo y al promotor la resolución de terminación, contra la cual podrán interponerse los recursos legalmente procedentes en vía administrativa y judicial, en su caso.

Una vez completado formalmente el expediente, el órgano ambiental llevará a cabo el análisis técnico del expediente.

En caso de que el órgano ambiental detecte la necesidad de aportar información adicional al Estudio de Impacto Ambiental, que el contenido del mismo no sea acorde con la información requerida, o que el promotor no haya tenido en cuenta debidamente las alegaciones recibidas, será requerido que sea debidamente completado. Como consecuencia, de ser necesario, el órgano sustantivo deberá realizar una nueva consulta a las Administraciones Públicas afectada y a las personas interesadas, que dispondrán de un plazo de 30 días hábiles.

2.1.3.7 Declaración de Impacto Ambiental

Una vez finalizado el análisis técnico del expediente de Evaluación de Impacto Ambiental, formulará la Declaración de Impacto Ambiental. Se trata de un informe preceptivo y determinante, que concluirá si procede o no la realización del proyecto, a los efectos medioambientales, así como las condiciones en las que puede desarrollarse, las medidas preventivas, correctoras y compensatorias.

El contenido mínimo de la DIA es el siguiente, de acuerdo con el artículo 41 de la Ley 21/2013:

- a) La identificación del promotor del proyecto y del órgano sustantivo, y la descripción del proyecto.
- b) El resumen del resultado del trámite de información pública y de las consultas a las Administraciones Públicas afectadas y a las personas interesadas.
- c) El resumen del análisis técnico realizado por el órgano ambiental.
- d) Las medidas que permitan prevenir, corregir y, en su caso, compensar los efectos adversos sobre el medio ambiente.
- e) En su caso, la conclusión de la evaluación de las repercusiones sobre la Red Natura 2000, así como las medidas compensatorias que deban establecerse, en caso de concurrir las circunstancias previstas en el artículo 46 de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- f) El programa de vigilancia ambiental.
- g) Si procede, la creación de una comisión de seguimiento.
- h) En caso de operaciones periódicas, la motivación de la decisión y el plazo a que se refiere la disposición adicional décima.
- i) En el caso de proyectos que vayan a causar a largo plazo una modificación hidromorfológica en una masa de agua superficial o una alteración del nivel en una masa de agua subterránea, se determinará si ello impedirá que se alcance el buen estado o potencial, o que ello supondrá un deterioro de su estado o potencial de la masa de agua afectada. En caso afirmativo, la declaración incluirá además una relación de todas las medidas factibles, que se hayan deducido de la evaluación, para paliar los efectos adversos ocasionados por el proyecto, así como una referencia a la conformidad de la unidad competente en planificación hidrológica del organismo de cuenca.

Posteriormente, la DIA se remitirá para su publicación en el plazo de quince días al *Boletín Oficial del Estado* o diario oficial correspondiente, haciéndose referencia en la sede electrónica del órgano sustantivo correspondiente.

Si en un plazo máximo de cuatro años tras publicarse la DIA en el BOE o diario oficial correspondiente, no se hubiese iniciado la ejecución del proyecto⁴, la DIA perderá su vigencia. En tal caso, el promotor deberá volver a iniciar el trámite de Evaluación de Impacto Ambiental, salvo que se acuerde una prórroga de la vigencia de la misma.

En cualquier caso, el promotor de cualquier proyecto sometido a EIA deberá comunicar al órgano ambiental la fecha de comienzo de la puesta en marcha de dicho proyecto.

Asimismo, cabe destacar que en caso de que un procedimiento judicial afecte, directa o indirectamente, la ejecución de un proyecto que cuente con DIA, el plazo de vigencia de la misma quedará suspendido hasta que se cuente con una sentencia judicial firme.

Por su parte, las condiciones de la declaración de impacto ambiental podrán modificarse cuando concurra alguna de las siguientes circunstancias [12]:

- a) La entrada en vigor de nueva normativa que afecta al cumplimiento de las condiciones establecidas en la DIA.
- b) Cuando la utilización de las nuevas MTD en el momento de formular la solicitud de modificación permiten una mejor y más adecuada protección del medio ambiente, respecto del proyecto o actuación inicial.
- c) Cuando se detecte que las medidas preventivas, correctoras o compensatorias son insuficientes, innecesarias o ineficaces.

El procedimiento de modificación de las condiciones de la declaración de impacto ambiental podrá iniciarse de oficio o a solicitud del promotor.

El órgano ambiental iniciará dicho procedimiento de oficio, bien por propia iniciativa o a petición razonada del órgano sustantivo, o por denuncia, mediante acuerdo.

El plazo máximo de emisión y notificación de la resolución de la modificación de la declaración de impacto ambiental será de treinta días, contados desde la recepción de los informes solicitados a las administraciones afectadas por razón de la materia. Esta resolución deberá publicarse en el *Boletín Oficial del Estado* o diario oficial correspondiente.

⁴ Se entiende por inicio de la ejecución del proyecto, al comienzo material de las obras o el montaje de las instalaciones necesarias para la ejecución del mismo, una vez obtenidas todas las autorizaciones exigibles.

2.2 Autorización Ambiental Integrada (AAI)

En el ámbito comunitario, la Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, referente a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) [13], nace como resultado de una nueva política europea en materia de medio ambiente, en el marco del Plan de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente 1999-2000 (V PACMA), y como herramienta de aplicación de esta política en los Estados Miembros (EEMM), mediante la creación de un nuevo permiso ambiental integrado. Esta Directiva queda derogada por la Directiva 2008/1/CE, de 15 de enero [14].

Por su parte, la Directiva 96/61/CE, de 24 de septiembre, así como el de sus sucesoras, tiene por objeto la prevención y la reducción integradas de la contaminación procedente de las actividades contenidas en su Anexo I. Por ello, se establecen medidas con la finalidad de evitar o, cuando no sea posible, reducir las emisiones de dichas actividades sobre la atmósfera, agua y suelo, incluyendo medidas relativas a residuos generados, todo ello en aras de alcanzar un nivel elevado de protección del medio ambiente en su conjunto.

Así, se tiene la intención de desarrollar un régimen de control de emisiones común para todos los medios. Ello se consigue creando un permiso único e integrador, para así evitar la transferencia de contaminación de un ámbito del medio ambiente a otro, como ya venía sucediendo al establecer un tratamiento por separado del control de las emisiones de la atmósfera, agua o suelo [15].

Actualmente, la disposición que se encuentra vigente en materia de IPPC es la Directiva 2010/75/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre, sobre las emisiones industriales [16], sustituyendo a la anteriormente citada Directiva 2008/1/CE, de 15 de enero.

Esta nueva Directiva, introduce diversas modificaciones en la legislación sobre Prevención y Control Integrados de la Contaminación, así como en el resto de legislación europea relativa a actividades industriales, con objetivos tales como el de obtener mejoras de la salud pública y ambiental, asegurando además la rentabilidad, y fomentando la innovación técnica [15].

La incorporación de la mencionada Directiva 96/61/CE, de 24 de septiembre, al ordenamiento jurídico español, se realiza con carácter básico, por medio de la Ley 16/2002, de 1 de julio de 2002, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación es la transposición de la citada, teniendo por objeto el de reducir y controlar, en la medida de lo posible, la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, con el fin de alcanzar una levada protección del medio ambiente en su conjunto y de la salud humana [17].

La citada Ley es posteriormente modificada por la Ley 5/2013, de 11 de junio⁵, y por la Ley 22/2011, de 28 de julio [18] [19]. Una vez entrada en vigor dichas leyes, se elabora el Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación [20]. Este texto refundido, integra en un único texto las sucesivas modificaciones de la Ley 16/2002, de 1 de julio, quedando esta derogada.

Asimismo, teniendo en cuenta la peculiaridad que suponen las Comunidades autónomas en España, dentro del marco de la UE, la Ley 16/2002, así como sus sucesoras, fueron transpuestas a gran parte de los ordenamientos legislativos autonómicos, obteniéndose así una Ley de carácter ambiental en casi todas las regiones del país, aunque respetando siempre el principio de jerarquía legislativa. Por consiguiente, la AAI es la resolución del órgano competente de la Comunidad autónoma en la que se ubique la instalación, por la cual se permite, a efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, explotar la totalidad o parte de una instalación, bajo determinadas condiciones destinadas a garantizar que la misma cumple el objeto y disposiciones marcadas por la Ley correspondiente. Esta autorización puede ser válida para una o más instalaciones o partes de instalaciones que tengan la misma ubicación y sean explotadas por el mismo titular.

⁵ Esta Ley tiene como objetivos principales una mayor simplificación administrativa y una legislación mas exigente desde el punto de vista de la protección medio ambiental, reforzando la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles.

En resumen, la AAI supone una integración y sustitución de un gran número de autorizaciones de carácter sectorial, en materia de residuos, emisiones, vertidos, suelos, etc., los cuales eran emitidos independientemente por las autoridades sectoriales competentes, con lo cual no se valoraba la instalación y el medio ambiente como un todo. En ese sentido, la AAI constituye una figura de intervención ambiental caracterizada por la simplificación administrativa de los trámites ambientales que son requeridos a las instalaciones, integrando todas las autorizaciones ambientales existentes en un trámite común [15].

2.2.1 Objeto y ámbito de aplicación

El objeto del RDL 1/2016, de 16 de diciembre es, de acuerdo con su artículo 1 perteneciente al Título I, el de evitar o, en su caso, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, agua y suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Por su parte, en el artículo 9, perteneciente al Título III, se establece que se somete al procedimiento de obtención de AAI la construcción, montaje y explotación de aquellas instalaciones en las que se desarrolle alguna de las actividades industriales incluidas en el Anexo I, a excepción de las instalaciones o partes de las mismas utilizadas para la investigación, desarrollo y experimentación de nuevos productos y procesos.

En el caso particular de las instalaciones mineras, se encuentran contempladas dentro de las categorías de actividades e instalaciones del citado anexo, con lo cual deberán ser sometidas a Autorización Ambiental Integrada. Concretamente, pertenecen a la categoría de *Producción y transformación de metales*.

«2. *Producción y transformación de metales.*

2.1 *Instalaciones de calcinación o sinterización de minerales metálicos incluido el mineral sulfurado.*

2.2 *Instalaciones para la producción de fundición o de aceros brutos (fusión primaria o secundaria), incluidas las correspondientes instalaciones de fundición continua de una capacidad de más de 2,5 toneladas por hora.*

2.3 *Instalaciones para la transformación de metales ferrosos:*

a) *Laminado en caliente con una capacidad superior a 20 toneladas de acero bruto por hora.*

b) *Forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 MW.*

c) *Aplicación de capas de protección de metal fundido con una capacidad de tratamiento de más de 2 toneladas de acero bruto por hora.*

2.4 *Fundiciones de metales ferrosos con una capacidad de producción de más de 20 toneladas por día.*

2.5 *Instalaciones:*

a) *Para la producción de metales en bruto no ferrosos a partir de minerales, de concentrados o de materias primas secundarias mediante procedimientos metalúrgicos, químicos o electrolíticos.*

b) *Para la fusión de metales no ferrosos, inclusive la aleación, así como los productos de recuperación y otros procesos con una capacidad de fusión de más de 4 toneladas para el plomo y el cadmio o 20 toneladas para todos los demás metales, por día.*

2.6 *Instalaciones para el tratamiento de superficie de metales y materiales plásticos por procedimiento electrolítico o químico, cuando el volumen de las cubetas o de las líneas completas destinadas al tratamiento empleadas sea superior a 30 m³».*

Asimismo, según lo dispuesto en el artículo 10, *Modificación de la instalación* perteneciente al Título III del RDL, aquellas modificaciones de carácter sustancial⁶ proyectadas en las instalaciones recogidas en el Anexo I, conllevan a una modificación de la AAI mediante procedimiento simplificado. Para ello, el titular de la instalación donde se pretenda llevar a cabo una modificación deberá presentar una solicitud de dicha modificación al órgano competente para otorgar la AAI, la cual debe incluir una serie de documentos que justifiquen técnica y razonadamente el carácter sustancial de la modificación a realizar, en base a los criterios que se presentan a continuación⁷.

«a) El tamaño y producción de la instalación.

b) Los recursos naturales utilizados por la misma.

c) Su consumo de agua y energía.

d) El volumen, peso y tipología de los residuos generados.

e) La calidad y capacidad regenerativa de los recursos naturales de las áreas geográficas que puedan verse afectadas.

f) El grado de contaminación producido.

g) El riesgo de accidente.

h) La incorporación o aumento en el uso de sustancias peligrosas».

A continuación, en la Figura 2-2 se muestra esquemáticamente la valoración de la naturaleza de una modificación.

⁶ Se considerará modificación sustancial si dicha modificación, o ampliación de la instalación, alcanza por sí sola los umbrales de capacidad establecidos en el Anexo I, o si ha de ser sometida al procedimiento de evaluación de impacto ambiental ordinario, de acuerdo con lo dispuesto en la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de *evaluación ambiental*.

⁷ Todo ello siempre y cuando la modificación proyectada no supere los umbrales de capacidad establecidos en el citado Anexo I, ya que en ese caso se considerará modificación sustancial de manera automática.

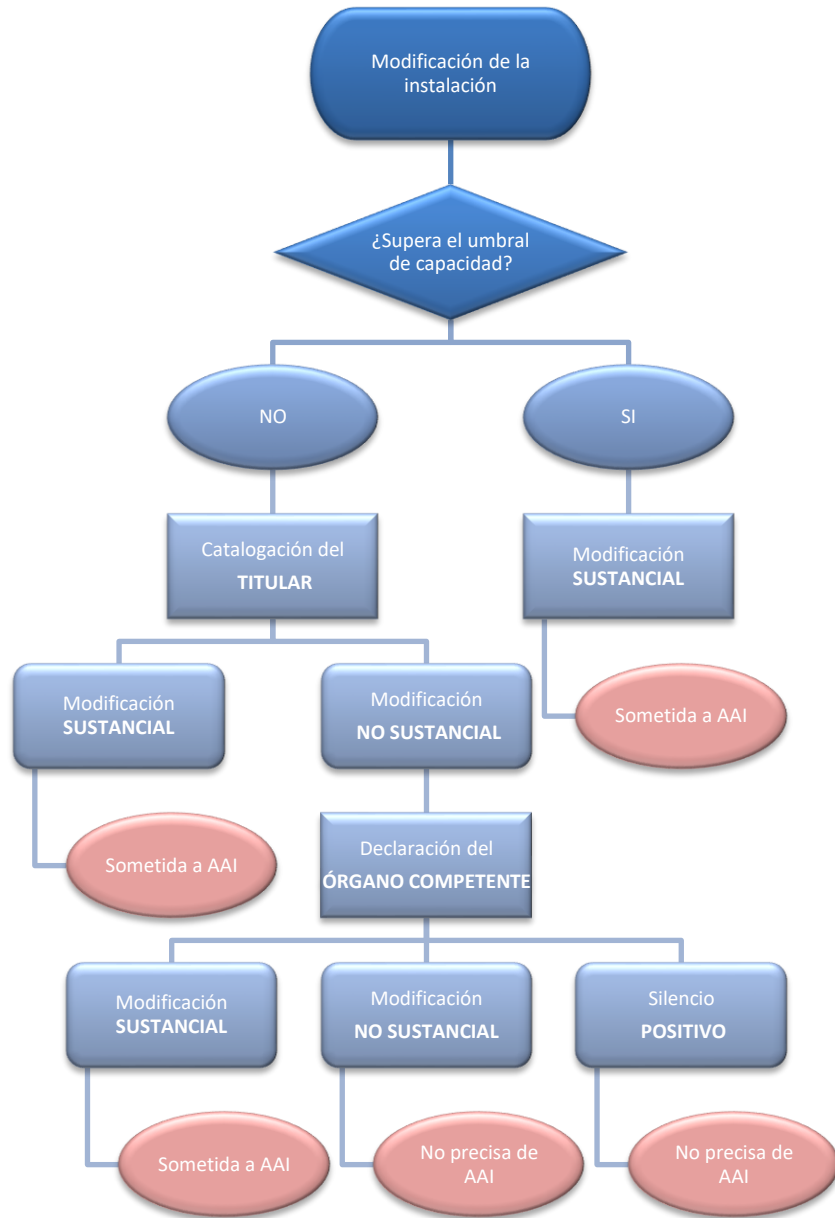


Figura 2-2. Valoración de la naturaleza de una modificación (Fuente: Elaboración propia [21])

Por el contrario, en caso de que la modificación suponga una disminución de su capacidad de producción, quedando por debajo de los umbrales marcados en el Anexo I, la AAI dejará de ser exigible, suponiendo una baja en el inventario de instalaciones sometidas a AAI [21].

2.2.2 Solicitud de Autorización Ambiental Integrada

2.2.2.1 Contenido de la solicitud

A continuación, se cita el contenido mínimo que debe incluir la solicitud de AAI, el cual servirá como base para lo dispuesto en las Comunidades Autónomas competentes en dicha materia.

- a) Proyecto básico que incluya, al menos, los siguientes aspectos:
1. Descripción detallada y alcance de la actividad y de las instalaciones, los procesos productivos y el tipo de producto.
 2. Documentación que el interesado presenta ante la administración pública competente para el control de las actividades con repercusión en la seguridad, salud de las personas o el medio ambiente de conformidad con la normativa que resulte de aplicación.
 3. Estado ambiental del lugar en el que se ubicará la instalación y los posibles impactos que se prevean, incluidos aquellos que puedan originarse al cesar la explotación de la misma.
 4. Recursos naturales, materias primas y auxiliares, sustancias, agua y energía empleados o generados en la instalación.
 5. Fuentes generadoras de las emisiones de la instalación.
 6. Tipo y cantidad de las emisiones previsibles de la instalación al aire, a las aguas y al suelo, así como la determinación de sus efectos significativos sobre el medio ambiente, y, en su caso, tipo y cantidad de los residuos que se vayan a generar.
 7. Tecnología prevista y otras técnicas utilizadas para prevenir y evitar las emisiones procedentes de la instalación o, y si ello no fuera posible, para reducirlas, indicando cuales de ellas se consideran mejores técnicas disponibles de acuerdo con las conclusiones relativas a las MTD.
 8. Las medidas relativas a la aplicación del orden de prioridad que dispone la jerarquía de residuos generados por la instalación.
 9. Medidas previstas para controlar las emisiones al medio ambiente.
 10. Otras medidas a considerar.
 11. Un breve resumen de las principales alternativas a la tecnología, las técnicas y las medidas propuestas, estudiadas por el solicitante, si las hubiera.
 12. En el caso de que la instalación tenga implantado un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales, se aportará la última declaración medioambiental validada y sus actualizaciones.
- b) Informe urbanístico del Ayuntamiento en cuyo territorio se ubique la instalación, acreditativo de la compatibilidad del proyecto con el planeamiento urbanístico.
- c) En su caso, la documentación exigida por la legislación de aguas y de costas para la autorización de vertidos a las aguas continentales o desde tierra al mar.
- d) La determinación de los datos confidenciales.
- e) Cualquier otra información y documentación acreditativa del cumplimiento de requisitos establecidos en la legislación aplicable incluida, en su caso, la referida a fianzas o seguros obligatorios que sean exigibles, entre otras, por la Ley 26/2007, de 23 de octubre.
- f) Cuando la actividad implique el uso, producción o emisión de sustancias peligrosas relevantes, teniendo en cuenta la posibilidad de contaminación del suelo y la contaminación de las aguas subterráneas en el emplazamiento de la instalación, se requerirá un informe base⁸ antes de comenzar la explotación de la instalación o antes de la actualización de la autorización.
- g) Se incluirá un resumen no técnico de todos los apartados, para facilitar su comprensión a efectos del trámite de información pública.

⁸ Este informe contendrá la información necesaria para determinar el estado del suelo y las aguas subterráneas, a fin de hacer la comparación cuantitativa con el estado tras el cese definitivo de las actividades.

Adicionalmente, la solicitud de la autorización ambiental integrada incluirá, de ser necesario, el estudio de impacto ambiental o, en su caso, el documento ambiental y demás documentación exigida por la legislación que resulte de aplicación.

2.2.2.2 Procedimiento de autorización

La solicitud de AAI se presenta ante el órgano designado por la Comunidad autónoma⁹ en donde se ubiquen las instalaciones.

Por su parte, las Administraciones públicas afectadas han de promover una participación efectiva de las personas interesadas, en el otorgamiento, modificación sustancial y revisión de la Autorización Ambiental Integrada.

El Ayuntamiento donde se ubique la instalación debe emitir el informe urbanístico correspondiente, previa solicitud por parte del interesado. En caso de resultar negativo dicho informe, siempre y cuando se haya recibido con anterioridad al otorgamiento de la AAI en cuestión, se pondrá fin al procedimiento.

Una vez completada la documentación, da comienzo un período de información pública¹⁰ común para aquellos procedimientos cuyas actuaciones se integran en el de AAI, como es el caso de la EIA.

Una vez concluido el período de información pública, se remitirán las alegaciones y observaciones recibidas a aquellos órganos susceptibles de pronunciarse al respecto.

Posteriormente, se emitirán los siguientes informes [21]:

- Un informe por parte del Ayuntamiento donde se ubique la instalación, en el cual se justifique la adecuación de dicha instalación a todos aquellos aspectos que sean de su competencia.
- Un informe del organismo de cuenca, en caso de que, de acuerdo con la legislación vigente en materia de aguas, la actividad analizada requiera una autorización de vertido a DPH de cuencas gestionadas por la Administración General del Estado. En dicho informe se deben determinar las características del vertido, así como las medidas correctoras a adoptar a fin de perseverar el buen estado ecológico de las aguas.

Tras realizar una evaluación ambiental de proyecto en su conjunto, la autoridad competente redactará una propuesta de resolución de AAI, cuyo contenido se presenta en el siguiente apartado. Esta propuesta incorpora aquellos resultados de los informes vinculantes emitidos, y decide sobre el resto de informes, aquellas cuestiones que se hayan podido plantear por los solicitantes, así como las resultantes del período de información pública.

El órgano competente para otorgar la AAI dispone de un plazo máximo de nueve meses para dictar la resolución que pone fin al procedimiento. En caso de transcurrir dicho periodo sin haberse notificado la resolución, podrá entenderse desestimada la solicitud presentada.

⁹ En caso de no existir una designación específica en dicha Comunidad autónoma, se presentará ante el órgano que ostente las competencias en materia de medio ambiente.

¹⁰ Quedan exentos de ser sometidos a información pública aquellos datos de la solicitud que gocen de confidencialidad.

2.2.2.3 Contenido de la Autorización Ambiental Integrada

A continuación, se presenta el contenido incluido en la Autorización Ambiental Integrada.

- a) Los valores límite de emisión para las sustancias contaminantes enumeradas en el Anexo 2 y para otras sustancias contaminantes, que puedan ser emitidas en cantidad significativa por la instalación de que se trate y, en su caso, los parámetros o las medidas técnicas equivalentes que complementen o sustituyan a estos valores límite. Asimismo, deberán especificarse las mejores técnicas disponibles contenidas en las conclusiones relativas a las MTD que son utilizadas en la instalación para alcanzar los valores límite de emisión.
- b) Las prescripciones que garanticen, en su caso, la protección del suelo y de las aguas subterráneas.
- c) Los procedimientos y métodos que se vayan a emplear para la gestión de los residuos generados por la instalación, teniendo en cuenta la jerarquía de gestión de los mismos.
- d) Las prescripciones que garanticen, en su caso, la minimización de la contaminación con efectos negativos intercomunitarios o transfronterizos a larga distancia o transfronteriza.
- e) Los sistemas y procedimientos para el tratamiento y control de todo tipo de emisiones y residuos, con especificación de la metodología de medición, su frecuencia y los procedimientos para evaluar las mediciones.
- f) Las medidas relativas a las condiciones de explotación en situaciones distintas a las normales que puedan afectar al medio ambiente, como los casos de puesta en marcha y parada, fugas, fallos de funcionamiento y paradas temporales.
- g) Cualquier medida o condición establecida por la legislación sectorial aplicable.
- h) Las condiciones en que debe llevarse a cabo el cierre de la instalación.
- i) La obligación de comunicar al órgano competente regularmente y al menos una vez al año la información basada en los resultados del control de las emisiones y, cuando se apliquen valores límite de emisión que superen los valores de emisión asociados a las MTD, un resumen de resultados del control de las emisiones que permita compararlos con los niveles de emisión asociados con las mejores técnicas disponibles.
- j) Los requisitos adecuados para el mantenimiento y supervisión periódicos de las medidas adoptadas para evitar las emisiones al suelo y a las aguas subterráneas y, en su caso, los requisitos adecuados para el control periódico del suelo y las aguas subterráneas por lo que respecta a sustancias peligrosas que previsiblemente puedan localizarse.
- k) Las condiciones para evaluar el cumplimiento de los valores límite de emisión.
- l) En caso de que la autorización sea válida para varias partes de una instalación explotada por diferentes titulares, las responsabilidades de cada uno de ellos.

Adicionalmente, cabe destacar que la AAI contendrá, cuando sea exigible [21]:

- La Declaración de Impacto Ambiental o, en su caso, el informe ambiental, u otras figuras de evaluación ambiental establecidas en la normativa que resulte de aplicación.
- Las condiciones preventivas y de control necesarias en materia de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas de acuerdo con el Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, y demás normativa aplicable.
- Otras condiciones derivadas de las actuaciones que estén previstas en la normativa ambiental de aplicación.

2.2.2.4 Revisión de la Autorización Ambiental Integrada

En caso de ser requerido por el órgano competente, el titular debe presentar toda la información necesaria, correspondiente al apartado 2.2.1, para la revisión de las condiciones de la autorización. En su caso, se incluirán los resultados del control de las emisiones y otros datos que permitan una comparación del funcionamiento de la instalación con las Mejores Técnicas Disponibles descritas en las conclusiones relativas a las MTD aplicables y con los niveles de emisión asociados a ellas.

En cualquier caso, la AAI será revisada de oficio en los siguientes casos [21]:

- La contaminación producida por la instalación requiere la revisión de los VLE impuestos o la adopción de otros nuevos.
- Cuando sea posible reducir significativamente las emisiones sin suponer costes excesivos como consecuencia de importantes cambios en las mejores técnicas disponibles.
- La seguridad de funcionamiento del proceso o actividad haga necesario emplear otras técnicas.
- El organismo de cuenca estime, en base a normativa vigente en materia de aguas, circunstancias que justifiquen la revisión de la AAI en relación a vertidos al DPH de cuencas gestionadas por la Administración General del Estado.
- Sea necesario cumplir normas nuevas o revisadas en cuanto a la calidad ambiental, o así lo requiera la legislación sectorial correspondiente.

2.2.3 Coordinación con el procedimiento de EIA

Cuando corresponda al órgano ambiental de la Administración General del Estado la formulación de la DIA, no podrá otorgarse la Autorización Ambiental Integrada ni, en su caso, las autorizaciones sustantivas correspondientes, sin que previamente se haya dictado dicha declaración. En ese sentido, cuando el órgano ambiental estatal haya formulado la DIA, debe remitir una copia de la misma al órgano de la Comunidad Autónoma competente para conceder la AAI y, en su caso, al órgano estatal que otorga las autorizaciones sustantivas, debiendo incorporar los condicionantes establecidos en dicha declaración al contenido de ambos procedimientos.

En el caso de que la DIA dependa exclusivamente de la Comunidad Autónoma, podrá incluirse en la AAI siempre que así lo disponga la ley autonómica correspondiente, como es el caso de Andalucía, por medio de la Autorización Ambiental Unificada, tal y como se verá en el siguiente apartado.

En cualquier caso, existe una interrelación entre ambos procesos, de EIA y de AAI, de tal modo que están condicionados mutuamente [21]:

Por un lado, en la propia definición de Evaluación de Impacto Ambiental, se establece que este supone la etapa inicial de autorización administrativa de un proyecto en el ámbito medioambiental.

Por otro, mediante la Ley IPPC se estipula que el otorgamiento de la AAI, así como sus posteriores modificaciones, será de carácter previo a las demás autorizaciones sustantivas o licencias que sean obligatorias.

Asimismo, la citada Ley IPPC permite que las CCAA establezcan un mecanismo que integre el procedimiento de obtención de la AAI dentro de las actuaciones de EIA, cuando ello sea de aplicación y la Comunidad Autónoma tenga la competencia para ello. Esto ha conllevado que dichas Comunidades Autónomas aprueben diferentes leyes autonómicas que desarrollan la normativa básica estatal, en las cuales se integren ambos procedimientos, llevándose a cabo un solo proceso e información al público para la AAI y la EIA, cuando las instalaciones estén sujetas a ambos procedimientos.

No obstante, cabe destacar que, como consecuencia de lo anterior, en numerosos casos ha surgido la dualidad de autoridades competentes, bien por el tipo de instalación proyectada o por la necesidad o no de llevar a cabo una EIA. Se trata del órgano sustantivo y el órgano ambiental, cuya dualidad de órganos supone una fuente de importantes retrasos en las concesiones de las AAI, debido a las posibles discrepancias entre dichos órganos sucedidas a lo largo del procedimiento [21].

A continuación, en la Figura 2-3 se presenta un esquema en el cual se representa resumidamente el procedimiento integrado de solicitud de una autorización para la puesta en marcha de una obra o actividad desde que tiene lugar la concepción de la idea.

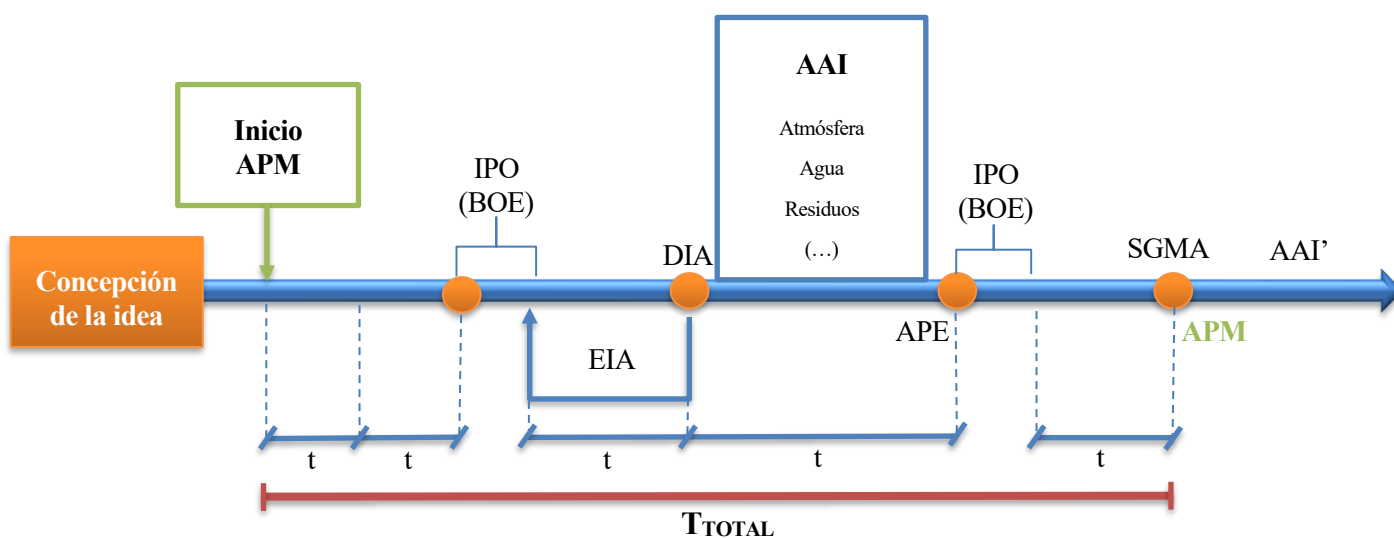


Figura 2-3. Procedimiento integrado de solicitud de Autorización Ambiental Integrada (Fuente: Elaboración propia [22])

En resumen, las fases principales recogidas en la Figura anterior son las siguientes:

1. Inicio del procedimiento para la Autorización de la Puesta en Marcha de la actividad (APM).
2. Fase de viabilidad y estudios previos (EEPP) por parte del promotor de las instalaciones durante un tiempo establecido por el mismo.
3. Anteproyecto de la EIA y de la AAI en el cual se realiza el Documento de Alcance, estableciéndose un periodo de Información Pública (IP) el cual culminará con su publicación en el BOE.
4. Inicio de la Evaluación de Impacto Ambiental, en la cual el órgano ambiental competente realiza un análisis técnico del expediente ambiental, formulando la Declaración de Impacto Ambiental (DIA), la cual está sujeta a una temporalidad y revisión bajo las condiciones establecidas.
5. Tras formularse la DIA comienza el periodo de solicitud de la AAI, que finalizará con la resolución de la misma, la Autorización para la Puesta en Funcionamiento (APE) y su publicación en el BOE.
6. Finalmente se obtiene la Autorización Para la Puesta en Marcha (APM) y la adopción de un Sistema de Gestión Medioambiental (SGMA).
7. La AAI tiene un periodo de vigencia determinado y está sujeta a modificaciones y revisiones (AAI').

2.3 Autorización Ambiental Unificada (AAU)

Como se ha visto con anterioridad, de acuerdo con el entorno y la peculiaridad competencial de las CCAA en España, la transposición de la Directiva IPPC a la normativa básica estatal permite que dicha Ley sea transpuesta análogamente a la mayoría de marcos legislativos autonómicos. De este modo, se obtiene una nueva Ley de carácter ambiental en prácticamente la totalidad de las Comunidades Autónomas, adquiriendo con ello las competencias en materia de Autorizaciones ambientales [15].

En el caso particular de Andalucía, la Ley 7/2007, de 9 de julio, *de Gestión Integrada de la calidad Ambiental*, conocida como Ley GICA [23], se sumaba a otra normativa y disposiciones autonómicas vigentes, introduciendo en esta Comunidad aspectos novedosos en la tramitación además de incluir aspectos de contaminación no considerados hasta entonces. En ese sentido, la Ley establece como principios los de prevención, cautela y responsabilidad.

Por su parte, los instrumentos de Prevención y Control Ambiental de la Ley GICA son los siguientes:

- Autorización Ambiental Integrada (AAI).
- Autorización Ambiental Unificada (AAU).
- Calificación Ambiental (CA).
- Evaluación Ambiental de Planes y Programas (EA).
- Autorización de Control de la Contaminación Atmosférica.

Como desarrollo de la citada Ley GICA, en lo referente a la AAU, el Decreto 356/2010, de 3 de agosto¹¹, desarrolla *el Reglamento que regula la Autorización Ambiental Integrada* [24]. Cabe destacar que, la AAU engloba todas aquellas autorizaciones que anteriormente se obtenían de forma separada (vertidos, emisiones, residuos, etc.) en un único procedimiento medioambiental, siendo la Delegación de Medio Ambiente el órgano ambiental competente encargado de recabar los informes de las distintas administraciones, y recoger en su Resolución los condicionantes que se impongan.

2.3.1 Objeto y ámbito de aplicación

La AAU es la resolución de la Consejería competente en materia de medio ambiente, por la cual se determina, a los efectos de la protección del medio ambiente, la viabilidad de la ejecución y las condiciones en que deben realizarse las actuaciones sometidas a dicha autorización conforme a lo previsto en el citado Decreto, teniendo en cuenta el resultado de la Evaluación de Impacto Ambiental o, en su caso, incorporando la correspondiente DIA. Asimismo, establecerá los condicionantes específicos relativos al resto de autorizaciones que en la misma se integren y los que resulten de los informes emitidos, así como las consideraciones referidas al seguimiento y vigilancia ambiental de la ejecución, desarrollo o funcionamiento de las actuaciones previstas o, en su caso, del cese de la actividad.

En lo referente al ámbito de aplicación, están sometidas a AAU todas aquellas instalaciones industriales en las cuales se pretenda desarrollar alguna de las actividades incluidas en el Anexo I del Reglamento que regula la AAU. Adicionalmente, deberán solicitar AAU dichas actividades cuando, una vez en funcionamiento, pretendan llevar a cabo traslados o modificaciones sustanciales. En resumen, están sometidas a AAU las siguientes actuaciones [25]:

¹¹ Este Decreto es posteriormente modificado por el Decreto 5/2012, de 17 de enero, por el que se regula la autorización ambiental integrada y se modifica el Decreto 356/2010, de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada.

- a) Las actuaciones recogidas en el Anexo I del Decreto por el que se desarrolla el Reglamento, las cuales se vaya a ejecutar o instalar en la Comunidad Autónoma Andaluza. Estas se agrupan en 12 categorías entre las que se encuentra la industria minera, objeto del presente Proyecto.
- b) La modificación sustancial de las actuaciones anteriormente citadas. Así, se entenderá que existe modificación sustancial cuando, en opinión del órgano ambiental competente, se produzca de forma significativa, incremento de las emisiones a la atmósfera, de los vertidos a los cauces públicos o al litoral, en la generación de residuos, en la utilización de recursos naturales o afección al suelo no urbanizable, urbanizable no sectorizado o afección a un espacio natural protegido o áreas de especial protección designadas en aplicación de normativas europeas o convenios internacionales.
- c) Las actuaciones que, correspondiéndoles solo Calificación Ambiental, se extiendan a más de un municipio.
- d) Aquellas actuaciones que, aun no estando incluidas en los puntos anteriores, puedan afectar directa o indirectamente a los espacios de la Red Natura 2000, cuando así lo decida el órgano ambiental.
- e) Las actuaciones correspondientes al apartado a) y las instalaciones sometidas a AAI, así como sus modificaciones sustanciales cuando, preste a servir exclusiva o principalmente para desarrollar o ensayar nuevos métodos o productos (y no se utilicen por más de dos años), así lo decida el órgano ambiental.
- f) Otras actuaciones que, sin estar incluidas en el Anexo I, por exigencias de la legislación básica estatal deban ser sometidas a EIA. En ese caso corresponde a la Consejería de Medio Ambiente la tramitación y resolución del procedimiento para la obtención de la AAU, y la vigilancia y control de las condiciones establecidas en la misma, así como la potestad sancionadora, en el ámbito de sus competencias.
- g) Casos particulares: actividades sometidas a AAU por decisión del órgano ambiental competente, en las cuales los titulares consultarán al órgano ambiental competente la pertinencia o no de someter la actuación al procedimiento de AAU, el cual deberá emitir la Resolución en un periodo de dos meses.

2.3.2 Procedimiento de solicitud de la AAU

La AAU, así como sus correspondientes modificaciones sustanciales, deben presentarse con el plazo suficiente para poder resolverse antes que el resto de autorizaciones sectoriales o licencias que sean exigibles. En todo caso, las informaciones públicas de la AAU, EIA y Autorización Sustantiva, en caso de ser necesarias, se realizarán conjuntamente.

2.3.2.1 Contenido de la solicitud de AAU

De acuerdo a lo estipulado en el Reglamento [24], la solicitud deberá incorporar la siguiente documentación:

- a) Proyecto técnico, cuyo contenido se incluye en el Anexo V del Reglamento.
- b) Informe de Compatibilidad Urbanística, expedido por el Ayuntamiento donde se realice la actuación.
- c) Informe de situación del suelo, en caso de que la actuación proyectada suponga un cambio de uso o se inicie en él una nueva actividad.
- d) Estudio de Impacto Ambiental, con información indicada en Anexo III o IV (dependiendo de si se trata de procedimiento ordinario o abreviado).

- e) En su caso, la documentación exigida por la Normativa Sectorial, recogida en Anexo VI, que le sea de aplicación a la actividad¹².
- f) Justificación de datos para los que se solicita rango de confidencialidad.
- g) Justificante de pago de tasas.
- h) Cualquier otra documentación que el titular estime conveniente para precisar o completar cualquier dato.

2.3.2.2 Procedimiento de obtención de la AAU

En cuanto a las fases en el procedimiento de tramitación de la AAU, serán similares a las tratadas en el apartado anterior referente a la AAI, con lo cual serán enumeradas a continuación [25].

- a) **Consultas previas:** En esta fase, la cual es opcional, el promotor podrá consultar a la Consejería de Medio Ambiente sobre el alcance, amplitud y grado de especificación de la documentación ambiental. Por su parte, dicha Consejería iniciará un periodo de consultas e información pública. Los plazos máximos serán de 30 días para la finalización del trámite de información pública y 20 para que la información sea comunicada al titular.
- b) **Fase inicial (o de Solicitud):** Los titulares o promotores podrán presentar ante la Consejería de Medio Ambiente una Memoria Resumen incluyendo las características más significativas de la actuación proyectada. Teniendo en cuenta lo anterior, la Consejería deberá poner a su disposición la información requerida, incluida la que obtenga de las consultas efectuadas a otros organismos e instituciones. Además, podrá dar su opinión en lo que respecta al alcance, amplitud y grado de especificación de la información que debe contener el Estudio de Impacto Ambiental y demás documentación.
- c) **Fase de Integración Ambiental:** En esta fase el promotor deberá elaborar el Estudio de Impacto Ambiental, cuyo alcance viene recogido en el Reglamento, junto con el resto de documentación necesaria para la consideración de elementos ambientales potencialmente afectados. Se deberán seguir los criterios marcados por la Consejería de Medio Ambiente a la hora de realizar el Estudio de Impacto ambiental, así como identificar, describir y evaluar los probables efectos negativos que puedan derivarse de la actuación.
- d) **Finalización del trámite (emisión de la Resolución de la AAU):** La Consejería de Medio Ambiente dictará y notificará la resolución que ponga fin al procedimiento en un plazo máximo de 8 meses desde la presentación de la solicitud mediante el procedimiento ordinario¹³. En caso de transcurrir el plazo sin que se haya comunicado la resolución se considerará como silencio negativo. No obstante lo anterior, el órgano ambiental podrá acordar justificadamente la ampliación del plazo hasta un máximo de 10 meses.
- e) **Fase de seguimiento:** Tras ser aprobada la Resolución por el órgano sustantivo, se desarrollará una fase de seguimiento, en la cual a la Consejería de Medio Ambiente le corresponderá llevar a cabo la vigilancia y control del cumplimiento de las condiciones ambientales establecidas en la AAU y, en su caso, la potestad sancionadora.

¹² Puede tratarse de autorizaciones de vertidos, autorización de emisiones a la atmósfera, autorización de producción de residuos, autorización de uso en zona de protección, autorización de actuaciones en espacios protegidos o monte público, cambio de uso del suelo, etc.

¹³ La duración será de 6 meses, en caso de tramitarse por un procedimiento abreviado. De igual modo, transcurrido este plazo sin que haya resolución expresa, la solicitud se considerará desestimada.

2.3.2.3 Obtención de la Resolución

La Autorización Ambiental Unificada determina las condiciones en que debe realizarse la actuación para asegurar la protección del medio ambiente, y de los recursos naturales teniendo en cuenta el resultado de la EIA y, en su caso, incorporando la correspondiente DIA. Igualmente, establecerá las condiciones del resto de autorizaciones que se integren en la misma, así como las consideraciones referidas al seguimiento y vigilancia ambiental de la ejecución, desarrollo o funcionamiento de la actuación. Se trata, por tanto, de una decisión unificada del órgano ambiental, en la cual se encuentran reflejados los aspectos relativos a vegetación, fauna, espacios protegidos, vías pecuarias, calidad del aire, calidad de las aguas, etc.

Con respecto a la vigilancia, inspección y control del cumplimiento de los condicionantes impuestos en la AAU esta corresponde a la Consejería de Medio Ambiente. Puede incluir la exigencia de comprobación previa a la puesta en marcha, medidas respecto a las condiciones de explotación, funcionamiento normal, cierre definitivo u otras situaciones que puedan afectar al medio ambiente.

2.3.2.4 Modificación y caducidad de la AAU

La modificación de la AAU se lleva a cabo cuando el progreso técnico, la existencia de Mejores Técnicas Disponibles o cambios sustanciales de las condiciones ambientales justifiquen nuevas condiciones de la AAU, y siempre que sea económicamente viable.

A continuación, se describen las formas en las que se puede realizar la modificación de la AAU [25].

- a) «Modificación de oficio»: se lleva a cabo cuando el órgano Ambiental competente tenga conocimiento de alguna de las circunstancias citadas con anterioridad. En tal caso, lo comunicará al titular junto con una propuesta de las nuevas condiciones de AAU, iniciando un periodo de alegaciones de 30 días.
- b) «Modificación a instancias de la persona titular de la instalación»: se realiza cuando, a juicio del titular, el progreso técnico y científico o la existencia de Mejores Técnicas Disponibles le permitan una disminución de la emisión de contaminantes, generación de residuos, un menor impacto ambiental, o cuando se produzcan cambios sustanciales de las condiciones ambientales de su entorno. En ese caso, el titular deberá presentar la correspondiente solicitud junto con una Memoria explicativa de las circunstancias y una propuesta de las nuevas condiciones de la AAU. En caso de transcurrir un periodo de 3 meses desde la presentación de la solicitud sin obtener la resolución expresa por parte de Medio Ambiente se considerará silencio positivo.

En cuanto al plazo de caducidad de la AAU, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones [25]:

- En caso de no haberse iniciado la ejecución de las actuaciones proyectadas¹⁴ en un plazo máximo de 5 años desde la notificación de la Resolución correspondiente, la AAU se considera caducada.
- En el caso de solicitarse una ampliación de plazo de caducidad, la Consejería de Medio Ambiente podrá declarar vigente la AAU siempre y cuando no se hayan producido cambios sustanciales en las instalaciones tras el otorgamiento de la misma. La solicitud de dicha ampliación por parte del titular deberá efectuarse al menos 3 meses antes de que se cumpla el plazo de caducidad de la AAU.

¹⁴ Se entiende como comienzo de la ejecución de la actuación el inicio de las obras, o actividades contenidas en el proyecto y no las labores preliminares o preparatorias de la actuación.

- Tras recibir la solicitud de ampliación de plazo, el órgano ambiental competente iniciará un periodo de consultas y revisión de la misma, y decidirá en un plazo de 60 días, transcurrido el cual sin obtenerse respuesta se considerará silencio positivo (la AAU será vigente por 2 años más).
- En caso de emitirse informe¹⁵, en este se determina el plazo de vigencia de la AAU, en ningún caso superior a 2 años. Transcurrido el citado periodo sin que se haya puesto en marcha las actividades contenidas en el proyecto será necesario solicitar una nueva AAU.

¹⁵ Este informe tiene la posibilidad de ser recurrible.

2.4 Estado y calidad de las aguas superficiales

Existen numerosas actividades que ponen en riesgo el buen estado de las aguas continentales superficiales y subterráneas. En ese sentido, son de carácter significativo los vertidos industriales y urbanos, así como los nitratos procedentes de la agricultura, la degradación física de los ecosistemas acuáticos y la sobreexplotación de los recursos hídricos [26].

En las últimas décadas en España se viene realizando un control de la calidad fisicoquímica y microbiológica de las aguas continentales. Se trata de controles basados en la realización de muestreos sobre una red de puntos fijos situados a lo largo de las cuencas hidrográficas, en las cuales se llevaban a cabo medidas in situ y controles analíticos en laboratorio [26]. En un principio, el objetivo principal de dichos controles era el de verificar el cumplimiento de las Directivas Comunitarias previas a la Directiva Marco del Agua (DMA) las cuales estaban referidas a la contaminación de las aguas causada por determinadas actividades.

Posteriormente, la Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000, *por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas* [27], conocida como Directiva Marco Europea del Agua (DMA) nace debido a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión de agua en la Unión Europea. Debido al continuo crecimiento de la demanda de aguas de buena calidad y en cantidades suficientes para todos sus usos, surge la necesidad de protección cualitativa y cuantitativa de las aguas, así como de garantizar su sostenibilidad [26].

Esta Directiva ha sufrido posteriormente numerosas modificaciones¹⁶, con sus correspondientes transposiciones a la legislación básica estatal. De esta forma, la última disposición estatal vigente en materia de aguas es el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, *por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental* [28].

Asimismo, cabe destacar que la transposición de la citada DMA al ordenamiento jurídico español se realizó por primera vez por medio de la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, *de medidas fiscales, administrativas y del orden social* [29], la cual incluye, en su artículo 129, la modificación del texto refundido de la Ley de aguas, aprobado por el RDL 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español la DMA, estableciendo un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Por otro lado, la aplicación de la DMA conlleva la puesta en marcha de nuevos programas de control que permitan obtener información sobre los elementos de calidad necesarios para clasificar el estado ecológico y químico de las masas de agua superficial, otorgándose una mayor importancia a los aspectos biológicos e hidromorfológicos en el diagnóstico integrado de la calidad de las aguas. Dicha obligación aparece recogida en el artículo 8, y anexo V de la citada Directiva. Análogamente, se incluye en el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, el cual se dictó conforme a lo establecido en la Ley de Aguas, texto refundido aprobado por el RDL 1/2001, de 20 de Julio (TRLA) [30], en cuyo artículo 42.1 se establece que los planes hidrológicos de cuenca comprenderán obligatoriamente, entre otros, las redes de control establecidas para el seguimiento del estado de las aguas superficiales.

A continuación, con carácter previo a la descripción de los programas de evaluación de la calidad de las aguas, se hará una descripción de los tipos de vertido existentes, así como del concepto de autorización de vertido.

¹⁶ La DMA ha sido posteriormente modificada por la Directiva 2008/105/CE, Directiva 2009/31/CE, Directiva 2013/39/UE y Directiva 2014/101/UE de la Comisión.

2.4.1 Tipos de vertido

Según lo establecido en el TRLA, así como en el artículo 245 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH) [31], se consideran vertidos aquellos que se realicen directa o indirectamente en las aguas continentales, así como en el resto del DPH, cualquiera que sea el procedimiento o técnica utilizada.

Asimismo, según el citado TRLA, se consideran Dominio Público Hidráulico:

- Las aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas.
- Los cauces de corrientes naturales, continuas o discontinuas.
- Los lechos de los lagos y lagunas y de los embalses superficiales en cauces públicos.
- Los acuíferos subterráneos.
- Las aguas procedentes de desalación de agua de mar, una vez incorporadas a cualquiera de los elementos citados con anterioridad.

Por su parte, según el RDPH, se considera vertido directo la emisión directa de contaminantes a las aguas continentales (o cualquier otro elemento del DPH), así como la descarga subterránea mediante inyección sin percolación a través del suelo o del subsuelo. En este último caso, se establece una distinción en función del destino del vertido y la técnica utilizada.

Los vertidos indirectos son aquellos realizados en aguas superficiales (o cualquier otro elemento del DPH) a través de azarbes (que transporta las aguas sobrantes de regadíos), redes de colectores de recogida de aguas residuales o de aguas pluviales, o por cualquier otro medio de desagüe. En el caso de que el vertido tenga por destino las aguas subterráneas, se considera indirecto si se realiza mediante filtración a través del suelo o del subsuelo.

El destino final de los vertidos indirectos, al igual que el de los directos, es el DPH, pero la forma en la que se incorporan al mismo, de manera indirecta a través de conducciones o a través de la filtración del terreno, hace que tengan una consideración diferente en la legislación. Esta diferenciación tiene efectos sobre el reparto de competencias en cuanto a la autorización de vertidos.

A continuación, se muestra un cuadro resumen con las competencias en cuanto a otorgamiento, gestión y seguimiento de autorizaciones de vertido.

Tabla 2-1. Competencias en cuanto a autorizaciones de vertidos a DPH (Fuente: Elaboración propia/ MITECO)

Tipo de vertido	Destino	Órgano competente	
		Cuencas intercomunitarias	Cuencas intracomunitarias
DIRECTO	Aguas superficiales (cauces, aguas de riego, subterráneas, etc.) o cualquier otro elemento del DPH	Organismos de cuencas	Administración hidráulica autonómica
	Aguas subterráneas	Organismos de cuencas	Administración hidráulica autonómica
INDIRECTO	Aguas superficiales (azarbes y canales de desagüe)	Organismos de cuenca	Administración hidráulica autonómica
	Aguas superficiales (red alcantarillado, colectores)	Órgano autonómico o local competente	Órgano autonómico o local competente
	Aguas subterráneas	Organismos de cuenca	Administración hidráulica autonómica

A continuación, se presenta una Tabla que relaciona las Demarcaciones Hidrográficas con el medio receptor correspondiente:

Tabla 2–2. Tipos de demarcaciones hidrográficas (Fuente: Elaboración propia [32])

Demarcaciones Hidrográficas	Medio Receptor
<ul style="list-style-type: none"> • Cuenca Mediterránea Andaluza • Cuencas Internas de Cataluña • Islas Baleares • Canarias • Galicia Costa • Cuencas Internas del País Vasco 	Cuencas intracomunitarias
<ul style="list-style-type: none"> • Cuenca Atlántica Andaluza 	Cuencas intercomunitarias transferidas ¹⁷
<ul style="list-style-type: none"> • Miño-Sil • Cantábrico • Duero • Tajo • Guadiana • Guadalquivir¹⁸ • Júcar • Segura • Ebro • Ceuta • Melilla 	Cuencas intercomunitarias de titularidad estatal

Asimismo, en la siguiente Figura se representa el reparto competencial en materia de vertidos al Dominio Público Hidráulico.

¹⁷ Cuenca hidrográfica o parte de ella transferida a la Comunidad Autónoma

¹⁸ El RD 1666/2008, de 17 de octubre, sobre traspaso de funciones y servicios de la Administración del Estado a la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de recursos y aprovechamientos hidráulicos correspondientes a las aguas de la cuenca del Guadalquivir que discurren íntegramente por el territorio de la comunidad autónoma.



Figura 2-4. Mapa del reparto competencial en materia de vertidos al DPH (Fuente: MITECO)

En cualquier caso, queda prohibido con carácter general, el vertido directo o indirecto de aguas y productos residuales susceptibles de contaminar las aguas continentales (o cualquier otro elemento del DPH), salvo que se cuente con una autorización previa [33].

La autorización de vertido, la cual se expone a continuación, tiene por objeto la consecución de los objetivos medioambientales establecidos. Así, se otorgará teniendo en cuenta las Mejores Técnicas Disponibles, atendiendo a las normas de calidad ambiental y los límites de emisión fijados reglamentariamente.

2.4.2 Autorización de vertido

La autorización de vertido supone una de las principales herramientas para gestionar la contaminación de las aguas. Ello es debido a que establece la vigilancia y control mediante programas de seguimiento, además de permitir actuar directamente sobre el origen de los focos de contaminación para reducir progresivamente el impacto que las distintas actividades provocan sobre las aguas [26].

El objetivo de la autorización de vertido es, por tanto, el de mantener el buen estado ecológico de las aguas, de acuerdo con las normas de calidad, los objetivos medioambientales y las características de emisión e inmisión establecidas en la normativa.

Asimismo, la autorización de vertido requiere una serie de condiciones que los vertidos deben cumplir para garantizar que se cumplen los objetivos anteriormente marcados, las cuales son citadas a continuación [33]:

- Origen de las aguas residuales y localización de puntos de vertido.
- Caudal y VLE del efluente.
- Instalaciones de depuración y evacuación que el organismo de cuenca considere suficientes para cumplir con la normativa sobre la calidad del medio receptor.
- Plazo de las distintas fases de obra de las instalaciones de depuración, y medidas a adoptar para reducir la contaminación.
- Plazo de vigencia de autorización.
- Importe del canon de control de vertidos, tasa destinada a la protección, mejora y estudio del medio receptor.
- Programas de reducción de la contaminación.

Aquellas instalaciones cuyos vertidos carezcan de autorización o bien incumplan alguno de los requisitos anteriormente citados, serán correspondientemente sancionadas, siendo el organismo competente encargado de la regulación y vigilancia de todos los vertidos el organismo de cuenca correspondiente [33].

2.4.3 Seguimiento y evaluación de la calidad de las aguas superficiales

En el artículo 92 del TRLA se establecen los objetivos de la protección de las aguas y del DPH, que incluyen, entre otros, prevenir el deterioro, proteger y mejorar el estado de las aguas; establecer medidas específicas para reducir la contaminación por sustancias prioritarias, así como garantizar un suministro de agua suficiente en buen estado. Finalmente, el citado artículo 92 obliga a que cada demarcación hidrográfica establezca programas de seguimiento del estado de las aguas, para obtener una visión general coherente y completa [30].

Dada la complejidad y extensión que supone incorporar al Reglamento del Dominio Público Hidráulico el seguimiento y evaluación del estado, así como de la protección de las aguas frente a sustancias prioritarias, se desarrolla el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, el cual integra todos los aspectos sobre el seguimiento y evaluación del estado de las aguas y Normas de Calidad Ambiental (NCA) [34].

De conformidad con lo anterior, el citado RD tiene los siguientes objetivos principales [34]:

- Establecer criterios básicos y homogéneos para el diseño e implantación de los programas de seguimiento del estado de masas de agua superficiales, así como para el control adicional de las zonas protegidas.
- Definir los criterios, condiciones de referencia y límites de cambio de clase para clasificar el estado ecológico de las masas de agua.
- Establecer las Normas de Calidad Ambiental (NCA) de las sustancias prioritarias y preferentes para clasificar el estado de las aguas, así como definir el procedimiento para el cálculo de estas normas para los contaminantes específicos.
- Recoger las obligaciones de intercambio de información y definir el sistema de información sobre el estado de las aguas, asegurando el cumplimiento de legislación que regula los derechos de acceso a la información y de participación pública.

2.4.3.1 Categorías y tipos de masas de agua superficiales

El estado y calidad de las masas de agua es el aspecto fundamental que marca la Directiva Marco del Agua, en la cual se define el concepto de calidad general como el referido a la suma de aptitud para los diferentes usos [27]. De este modo, el grado de calidad de la masa de agua es superior cuanto más uso permite, todo ello complementado por el concepto de estado, referido al grado de alteración que presenta respecto a sus condiciones naturales, y viene determinado por el peor valor de su estado químico y ecológico [35].

La DMA ha previsto la definición de varias categorías de masas de agua, para facilitar la gestión de las mismas, resultando las siguientes [27]:

- a) «Ríos»: Masas de agua continental que fluye en su mayor parte sobre la superficie del suelo, pero también puede fluir bajo tierra en parte de su curso.
- b) «Lagos»: masas de agua superficiales quietas.
- c) «Aguas de transición»: Masas de agua superficial próximas a la desembocadura de los ríos, siendo parcialmente salinas como consecuencia de su proximidad a las aguas costeras, pero que reciben una notable influencia de los flujos de agua dulce.
- d) «Aguas costeras»: Aguas superficiales situadas hacia tierra desde una línea cuya totalidad de puntos se encuentra a una distancia de una milla náutica mar adentro desde el punto más próximo de la línea base que sirve para medir la anchura de las aguas territoriales y que se extienden, en su caso, hasta el límite exterior de las aguas de transición.
- e) «Masas de agua artificial»: Una masa de agua superficial creada por la actividad humana.
- f) «Masas de agua muy modificada»: Una masa de agua superficial que, como consecuencia de alteraciones físicas producidas por actividad humana, ha experimentado un cambio sustancial en su naturaleza.

Por su parte, la clasificación de aguas superficiales en tipos permite identificar unas condiciones biológicas de referencia para el sistema de clasificación ecológico, comunes a las masas de agua pertenecientes a cada uno de los tipos. La clasificación se realiza atendiendo a los criterios establecidos por el citado RD 817/2015, de 11 de septiembre.

2.4.3.2 Programas de seguimiento de las masas de agua superficiales

Los programas de seguimiento son una herramienta básica para la gestión de las aguas, y deben proporcionar la información necesaria para evaluar la efectividad de las medidas adoptadas y el grado de cumplimiento de los objetivos marcados. De esta forma, su diseño debe cumplir las siguientes funciones [35]:

- Conocer el estado de las aguas.
- Identificar la salud de los ecosistemas acuáticos atendiendo a su sostenibilidad, riqueza y biodiversidad.
- Determinar el grado de contaminación de las aguas.
- Valorar las consecuencias de la emisión de contaminantes procedentes de fuentes de contaminación puntual y difusa.
- Evitar o reducir el deterioro producido por la presencia de sustancias prioritarias.
- Evaluar el efecto de las alteraciones hidromorfológicas, etc.

De acuerdo con lo establecido en el RD 817/2015, de 11 de septiembre, el diseño e implantación de los programas de seguimiento deben incluir, al menos, las estaciones de muestreo, elementos de calidad, así como

las frecuencias de muestreo asociados al cada programa, conforme a los requisitos básicos incluidos en el Anexo I de la citada disposición.

Asimismo, dichos programas de seguimiento han de ser revisados cada 6 años, siendo la información generada recogida en el sistema de información sobre el estado y calidad de las aguas, regulado por el artículo 30.

Por su parte, los programas de seguimiento pueden ser, en función de las características del muestreo que se lleve a cabo, programas de seguimiento periódico o programas de muestreo automático de la calidad de las aguas. A su vez, la clasificación prevista en el RD 817/2015, de 11 de septiembre, establece que dichos programas son el Programa de control de vigilancia, el Programa de control operativo y el Programa de control de investigación.

A continuación, se describen dichos programas de seguimiento.

1. Programas de seguimiento periódico

a) Programas de control de vigilancia

Los objetivos de este tipo de programa son principalmente obtener una visión general y completa del estado de las masas de agua, evaluar los cambios o tendencias a largo plazo, como consecuencia de la actividad antropogénica extendida, así como consecuencia de cambios en las condiciones naturales; completar el estudio de repercusiones de la actividad humana en el estado de las masas de agua superficiales y, por último, estimar la carga contaminante a lo largo de la frontera española así como la que se transmite al medio marino [35]. Está integrado por los siguientes subprogramas:

a.1) «Subprograma de seguimiento del estado general de las aguas»

En este programa se recaba la información necesaria para realizar una evaluación del estado general de las aguas superficiales y de los cambios que experimentan dichas aguas a largo plazo, como consecuencia de una actividad antropogénica extendida.

Para la ubicación de las estaciones de muestreo, se ha de asegurar que se localicen en masas de agua que reflejen la heterogeneidad de la demarcación, mientras que el número de estaciones aumentará conforme aumente dicha heterogeneidad de la cuenca. En cualquier caso, se debe garantizar el control en puntos donde el nivel del flujo de agua sea significativo dentro del conjunto de la demarcación hidrográfica, así como en puntos donde las condiciones del medio acuático circundante no estén bajo influencia directa de un foco de contaminación ni sometida a mareas.

En este subprograma se deberán controlar todos los elementos de calidad biológicos, hidromorfológicos y físicoquímicos generales, así como las sustancias preferentes que se vierten y contaminantes vertidos en cantidades sustanciales.

En cuanto a las frecuencias de muestreo, las estaciones se muestrearán como mínimo durante un año dentro del periodo que abarque el plan hidrológico de cuenca. Durante dicho periodo de tiempo, los elementos se controlarán conforme a las frecuencias de muestreo que se establecen en la siguiente Tabla.

Tabla 2–3. Frecuencias anuales del Programa de Control de Vigilancia (Fuente: Elaboración propia [28])

ELEMENTOS DE CALIDAD		N.º DE MUESTREOS MÍNIMOS ¹⁹			
		RÍO	LAGO	AGUAS DE TRANSICIÓN	AGUAS COSTERAS
BIOLÓGICOS	Fitoplancton	2 ²⁰	2	2	2
	Otra flora acuática: diatomeas	1	-	-	-
	Macroinvertebrados	1	1	1	1
	Peces	1	1	1	-
HIDROMORFOLÓGICOS	Continuidad	1	-	-	-
	Régimen hidrológico	continuo	12	-	-
	Morfología	1	1	1	1
	Régimen de mareas	-	-	1	1
QUÍMICOS Y FÍSICOQUÍMICOS GENERALES	Condiciones térmicas	4	4	4	4
	Oxigenación	4	4	4	4
	Salinidad	4	4	4	-
	Estado de nutrientes	4	4	4	4
	Estado de acidificación	4	4	-	-
SUSTANCIAS INDIVIDUALES	Sustancias prioritarias	12	12	12	12
	Contaminantes específicos	4	4	4	4

Cabe señalar que, las fechas elegidas para efectuar el seguimiento deben ser tales que se reduzca al máximo el impacto de la variación estacional de los resultados, para así reflejar las alteraciones en la masa de agua debidas a cambios antropogénicos y condiciones naturales.

a.2) «Subprograma de referencia»

En este subprograma se evalúan las tendencias a largo plazo en el estado de las masas de agua debidas a cambios en las condiciones naturales, y se establecen las condiciones de referencia específicas para cada tipo de masa de agua.

En este caso, las estaciones de muestreo deben ubicarse en masas de agua que no presenten alteraciones mínimas o ausencia de ellas.

Por su parte, deberán ser muestreados, al menos, todos los elementos de calidad biológicos, hidromorfológicos y fisicoquímicos generales.

Al igual que en el subprograma anterior, las estaciones deberán ser muestreadas como mínimo durante un año dentro del periodo que abarque el plan hidrológico de cuenca.

Los elementos de calidad biológicos e hidromorfológicos se controlarán una vez, excepto el fitoplancton que será dos veces. Los elementos de calidad fisicoquímicos generales se controlan cuando se acuda a muestrear elementos biológicos.

¹⁹ En casos concretos que se encuentren justificados se podrán aplicar intervalos mayores.

²⁰ Masas de agua con tendencia significativa a la eutrofización.

a.3) «Subprograma de control de emisiones al mar y transfronterizas»

En este subprograma se estima la carga contaminante que cruza la frontera española y la que es transmitida al medio marino.

Por su parte, la información obtenida a través de este programa se encuentra recogida en las diferentes estaciones de control que lo integran. Esta información se encuentra disponible en el Geoportal del Ministerio [36], concretamente en la categoría de *Estado y calidad de las aguas superficiales*. Dentro de ella, se distinguen los diferentes subprogramas descritos con anterioridad.

b) Programas de control operativo

El programa de control operativo integra la información necesaria para determinar el estado de las masas de agua superficiales que presentan riesgo de incumplir los objetivos medioambientales establecidos por la DMA. Además, supone una herramienta útil para determinar el grado de efectividad de los programas de medidas implantados para recuperar el buen estado [35].

Por consiguiente, este control se lleva a cabo sobre las masas de agua identificadas en riesgo de no cumplir con sus objetivos medioambientales, y en aquellas que se viertan sustancias incluidas en la lista de sustancias prioritarias.

En la información asociada a cada estación del Programa de control operativo se señalan las presiones causantes del riesgo sobre la masa de agua aplicando la siguiente clasificación [28]:

1. Fuentes puntuales significativas.
2. Fuentes difusas significativas.
3. Extracciones de agua significativas.
4. Regulaciones de agua significativas.
5. Alteraciones morfológicas significativas.
6. Otras incidencias antropogénicas significativas.
7. Usos del suelo.

En cuanto a las estaciones de muestreo, estas se ubicarán en masas de agua en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales, así como en masas de agua en las que se viertan contaminantes recogidos dentro de la lista de sustancias prioritarias.

Los parámetros controlados en las estaciones de muestreo se centran en indicadores correspondientes a los elementos de calidad biológicos e hidromorfológicos más sensibles a la presión o presiones a las que esté sometida la masa de agua en cuestión. Además, incluye el seguimiento de las sustancias prioritarias vertidas y demás contaminantes vertidos en cantidades significativas.

Por su parte, las estaciones se muestrearán durante todo el periodo que abarque el plan hidrológico de cuenca. No obstante, este programa puede sufrir modificaciones durante dicho periodo. En particular, se podrá reducir cuando se considera que el impacto no es importante, se elimine la correspondiente presión o se alcance el «buen estado». Los elementos se muestrearán con las frecuencias de muestreo recogidas en la siguiente Tabla.

Tabla 2–4. Frecuencias de muestreo del Programa de Control Operativo (Fuente: Elaboración propia [28])

ELEMENTOS DE CALIDAD		FRECUENCIAS MÍNIMAS DE MUESTREO ²¹			
		RÍO	LAGO	AGUAS DE TRANSICIÓN	AGUAS COSTERAS
BIOLÓGICOS	Fitoplancton	6 meses ²²	6 meses	6 meses	6 meses
	Otra flora acuática: diatomeas	1 año	-	-	-
	Otra flora acuática: macrófitos	3 años	3 años	3 años	3 años
	Macroinvertebrados	1 año	3 años	3 años	3 años
	Peces	3 años	3 años	3 años	-
HIDROMORFOLÓGICOS	Continuidad	6 años	-	-	-
	Régimen hidrológico	continuo	1 mes	-	-
	Morfología	6 años	6 años	6 años	6 años
	Régimen de mareas	-	-	6 años	6 años
QUÍMICOS Y FISICOQUÍMICOS GENERALES	Condiciones térmicas	3 meses	3 meses	3 meses	3 meses
	Oxigenación	3 meses	3 meses	3 meses	3 meses
	Salinidad	3 meses	3 meses	3 meses	-
	Estado de nutrientes	3 meses	3 meses	3 meses	3 meses
	Estado de acidificación	3 meses	3 meses	-	-
SUSTANCIAS INDIVIDUALES	Sustancias prioritarias	1 mes	1 mes	1 mes	1 mes
	Contaminantes específicos	3 meses	3 meses	3 meses	3 meses

La información contenida en las estaciones de control que integran el programa de control operativo, al igual que para las del programa de control de vigilancia, se encuentra disponible en el apartado de *Estado y calidad de las aguas superficiales* habilitado en el Geoportal del Ministerio [36], donde se encuentran los siguientes subprogramas:

- «Control de las sustancias peligrosas»: incluye las estaciones situadas en zonas con masas de agua que se encuentren en riesgo por el vertido de sustancias peligrosas.
- «Control de plaguicidas»: incluye las estaciones situadas en zonas con masas de agua en riesgo por plaguicidas de origen agrario.

c) Control de zonas protegidas

Se incluye el control adicional de zonas recogidas dentro del registro de zonas protegidas, contenido en el TRLA. Entre ellas, destaca el control de aguas destinadas a abastecimientos, referido al control de aguas continentales destinadas a la producción de agua para consumo humano, cuyo objeto principal es garantizar la cantidad suficiente de agua de calidad para dicho fin y evitar su deterioro [35].

Adicionalmente, se establece un control ambiental de aguas de baño, aguas afectadas por nitrato de origen agrario y aguas sensibles por vertidos urbanos.

²¹ En casos concretos que se encuentren justificados se podrán aplicar intervalos mayores.

²² Masas de agua con tendencia significativa a la eutrofización.

Por su parte, de igual modo que para los anteriores programas de control, el Geoportal del Ministerio [36] recoge de las estaciones de control correspondientes.

d) Programas de control de investigación

Este control se implanta en los siguientes casos en los cuales se desconoce el origen del incumplimiento de los objetivos medioambientales; o bien si el Control de vigilancia indica la improbabilidad de alcanzar dichos objetivos y no se haya puesto en marcha un Control operativo, que determine las causas por las cuales no se han podido alcanzar. También en situaciones en las que se requiera determinar la magnitud y el impacto ocasionado por una contaminación accidental [28].

De este modo, este control permite definir el programa de medidas requerido para cumplir con los objetivos medioambientales y, en su caso, aquellas medidas específicas a tomar para remediar los efectos de una contaminación accidental [28].

2. Sistemas automáticos de calidad de las aguas

El Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA) constituye un proyecto implantado por la Dirección de Calidad de las Aguas, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, el cual tuvo lugar en dos fases comprendidas entre septiembre de 1993 y noviembre de 1995 [37].

El sistema SAICA responde a la necesidad de disponer de información precisa y fiable de la calidad de las aguas continentales. Este control puede aplicarse en puntos críticos, para vigilar vertidos en zonas protegidas, a través de la medición de parámetros fisicoquímicos en tiempo real, activándose alarmas de contaminación. De este modo se tiene una vigilancia en tiempo real de la calidad de las aguas de los ríos, posibilitando la detección de posibles vertidos con rapidez, y facilitando la localización de las posibles causas asociadas.

Así, el SAICA está formado por una Red de Estaciones Automáticas de Alerta (EAA) instaladas a lo largo de los cursos de los ríos, en aquellos tramos cuyo estado es considerado crítico. En dichas estaciones se miden en tiempo real parámetros básicos representativos de la calidad de las aguas, tales como nivel, caudal, pH, conductividad, turbidez, temperatura, oxígeno disuelto, amonio, materia orgánica, fosfatos, nitratos y algunos metales pesados [37].

Posteriormente, los datos son enviados al Ministerio y a Centros de procesamiento de datos de las Confederaciones Hidrográficas, donde son gestionados por personal especializado en la materia. Una vez se van recopilando los datos correspondientes, se realizan estudios de comportamiento y se analizan curvas de tendencia mediante técnicas que varían en función del parámetro analizado y los rangos de medida.

La red SAICA actualmente cuenta con aproximadamente 200 estaciones automáticas de alerta, en zonas con usos especialmente críticos (zonas de abastecimiento, zonas protegidas, etc.) las cuales necesitan acciones preventivas y en puntos en los que se prevé posibles episodios de contaminación, ya sea debido a grandes aglomeraciones urbanas, zonas afectadas por vertidos industriales, etc. [35].

En definitiva, la finalidad principal sobre la que versa la red SAICA se resume en los siguientes aspectos [37]:

- Proporcionar información cualitativa de la contaminación detectada y su evolución en el tiempo, analizando la tendencia de la misma.
- Complementar las redes de control periódico de la calidad de las aguas ya existentes.
- Monitorizar en tiempo real el estado de las aguas, permitiendo actuaciones inmediatas de alerta a las captaciones existentes.
- Facilitar el control y seguimiento a corto plazo del vertido.

2.4.3.3 Evaluación del estado de las masas de agua

El estado de las masas de agua superficial queda determinado por el peor valor de su estado ecológico y químico [28].

Así, se establecen cinco clases de estado ecológico, en función del grado de alteración de la masa de agua respecto a sus condiciones de referencia. Esto es, muy bueno, bueno, moderado, deficiente y malo.

Para clasificar el estado ecológico de las masas de agua superficial se aplicarán los indicadores de los elementos de calidad biológicos, químicos y fisicoquímicos, establecidos, así como las NCA calculadas para los contaminantes específicos o en su caso, las NCA establecidas para las sustancias preferentes [28].

Para la categoría de ríos, la cual es competencia del presente Proyecto, los elementos de calidad para la clasificación del estado ecológico, recogidos en el artículo 10 del RD 817/2015, de 11 de septiembre, son los siguientes:

«1. Elementos de calidad biológicos:

- a) Composición y abundancia de fauna bentónica de invertebrados.*
- b) Composición y abundancia de flora acuática.*
- c) Composición, abundancia y estructura de edades de fauna ictiológica.*

2. Elementos de calidad químicos y fisicoquímicos de soporte a los elementos de calidad biológicos:

- a) Generales: condiciones térmicas y de oxigenación, salinidad, estado de acidificación y nutrientes.*
- b) Contaminantes específicos vertidos en cantidades significativas.*

3. Elementos de calidad hidromorfológicos de soporte a los elementos de calidad biológicos:

- a) Régimen hidrológico: caudales e hidrodinámica del flujo de las aguas y conexión con masas de agua subterránea.*
- b) Continuidad del río.*
- c) Condiciones morfológicas: variación de la profundidad y anchura del río, estructura y sustrato del lecho del río y estructura de la zona ribereña.*

4. Los indicadores correspondientes a los elementos de calidad biológicos, químicos y fisicoquímicos e hidromorfológicos de soporte aplicables a cada tipo de masa de agua se definen en el anexo II. Los contaminantes específicos quedan definidos en los anexos V y VI».

En cuanto al estado químico de las aguas superficiales sólo se consignará como «bueno» o «no alcanza el buen estado».

Para poder clasificar el estado ecológico de las masas de agua, es preciso contar con los valores de los elementos de calidad biológicos en condiciones inalteradas. Éstas condiciones se dan cuando no existen alteraciones antropogénicas de los valores de los elementos de calidad fisicoquímica e hidromorfológica correspondientes al tipo de masa de agua superficial, o existen alteraciones de muy escasa importancia, en comparación con los asociados normalmente con ese tipo en condiciones inalteradas [35].

Una vez obtenidos estos valores, sirven de referencia para poder compararlos con los resultados de los programas de seguimiento. En caso de existir grandes diferencias entre lo observado (programas de seguimiento) y las condiciones de referencia estaremos hablando de masas de agua en estados «peor que bueno». En el caso contrario hablaremos de masas de agua en «buen estado» [35].

2.5 Condicionantes requeridos para el cumplimiento de la Evaluación de Impacto Ambiental de actividades mineras

La creciente preocupación el cambio climático y el desarrollo sostenible requiere que, tanto promotores de actividades mineras como administraciones públicas competentes, den prioridad a la responsabilidad medioambiental a la vez que intenten maximizar los beneficios económicos de la industria. Teniendo en cuenta lo anterior, la monitorización ambiental de las actividades mineras, dentro del marco de la Evaluación de Impacto Ambiental, resulta esencial para evaluar tanto los aspectos ambientales como los potenciales impactos asociados a dichas actividades, así como el estado aguas arriba y aguas debajo del proceso.

Así, los programas de monitorización de las actividades mineras se establecen de acuerdo a una serie de propósitos, los cuales son expuestos a continuación [38] [39]:

- Detectar y analizar las diferencias en los elementos físicos, químicos y biológicos de la actividad minera y su alrededor, tales como la calidad de las masas de agua y del suelo durante la explotación.
- Confirmar que se alcanzan los objetivos planificados, los cuales son fijados desde la primera etapa de planificación de la actividad.
- Determinar los riesgos medioambientales asociados a los impactos e identificar las medidas de remediación o, en su caso, disminución del riesgo, tales como la monitorización de la estabilidad de balsas de lodos (tailings) o el mantenimiento de los niveles de seguridad adecuados.
- Asegurar que las emisiones y descargas cumplen con la normativa de aplicación relacionada con los impactos medioambientales de la industria minera, tales como mantener los niveles de pH en la corriente de vertido procedente de balsas de lodos (tailings) de acuerdo a los niveles establecidos por normativa.
- Identificar la eficiencia minera de las actividades y establecer el nivel de objetivos alcanzados, tales como la cantidad total de usos del agua, así como su descarga y reutilización en el proceso.
- Comprender la interacción entre varios impactos medioambientales como por ejemplo el nivel de contaminación por metales pesados en suelos y como ello afecta a los cultivos del entorno, o bien contenido de metales en el río, y su afeción a la flora y fauna de la cuenca.
- Verificar si los impactos medioambientales se producen como consecuencia de la actividad minera o de otras actividades (naturales o antropogénicas).
- Evaluar la actuación de las medidas de remediación consideradas.
- Establecer una línea base para llevar a cabo un control de las auditorías.

Por su parte, para llevar a cabo la evaluación ambiental de los impactos generados por las actividades mineras, tal y como se ha descrito en epígrafes anteriores, son necesarios una serie de requerimientos, particulares para cada impacto generado.

En las Tablas 2-5 y 2-6 se recogen de forma esquemática los requerimientos de los Planes de Vigilancia Ambiental (PVA) para cumplir con la EIA, particularizados para los diferentes impactos medioambientales, según si se trata de actividades mineras a cielo abierto o subterráneas.

Tabla 2–5. Requerimientos para cumplir con las exigencias de la EIA (Fuente: Elaboración propia [38] [39])

Agua			
Impactos	Requerimientos	Nivel de monitorización	
<p>Minería superficial</p> <ul style="list-style-type: none"> - AMD - Contaminación por metales pesados - Uso extensivo de agua - Contaminación química 	<p>1. Protección de la calidad de las aguas</p> <p>Se debe asegurar que la descarga de efluentes no cambie significativamente la calidad de aguas superficiales y subterráneas, así como que no se sobrepasen las concentraciones establecidas para los parámetros de calidad.</p> <p>2. Modelización de la calidad de las aguas</p> <p>Para nuevas instalaciones o cambios sustanciales en las existentes, se debe establecer un programa de modelización numérico en el cual:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Se establezca una línea base a partir de resultados de la caracterización geoquímica y del programa de monitorización, para identificar los potenciales contaminantes. b. Se lleve a cabo un registro de cambios temporales en la calidad y cantidad de aguas en operación y en clausura. c. Se lleve a cabo una predicción de la contaminación generada por las actividades, así como de la calidad de aguas superficiales y subterráneas en los puntos de medida durante operación, clausura y post-clausura, incorporando un plan de gestión de agua y movimiento de contaminantes desde la fuente de generación hasta el medio receptor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorización regional durante años/décadas 	
<p>Minería subterránea</p>	<p>3. Programa de monitorización de la calidad de las aguas</p> <p>Se debe implementar y mantener un programa documentado de monitorización de los potenciales impactos del proyecto minero en las aguas superficiales y subterráneas, en el cual:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Se debe comparar los datos predictivos con los datos actuales de la calidad de las aguas, así como otra información que ayude a definir la magnitud y el destino de los contaminantes generados. b. La efectividad de las medidas de mitigación relacionadas con la calidad de las aguas deben evaluarse anualmente, utilizando los resultados de la monitorización. Cualquier cambio debe ser registrado en un correspondiente plan de gestión. <p>4. Muestreo de la calidad de las aguas</p> <p>El programa de monitorización debe incluir un plan de muestreo de la calidad de las aguas generando una línea base a partir de los resultados de calidad de aguas, organismos acuáticos bentónicos y biológicos, localización de la explotación, dirección de los flujos de aguas superficiales y subterráneas y caracterización geoquímica de residuos mineros y otros minerales susceptibles de generar impactos sobre la calidad de las aguas.</p>		

Tabla 2–6. Requerimientos para cumplir con las exigencias de la EIA (CONT.)

Atmósfera			
Impactos	Requerimientos	Nivel de monitorización	
Minería superficial	<ul style="list-style-type: none"> -Polvo - Material particulado - Emisiones a la atmósfera 	<p>1. Plan de gestión de calidad del aire</p> <p>Se debe desarrollar y mantener un plan documentado de gestión de la calidad del aire que se ajuste a las cuestiones específicas del sitio minero evolucionando a medida que los datos se encuentren disponibles.</p> <p>2. Modelización y monitorización</p>	- Monitorización local durante días/meses
Minería subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Polvo 	<p>Durante la operación se debe monitorizar y recopilar los datos de calidad del aire durante las operaciones asociadas al proyecto minero.</p> <p>a. Se deben establecer modelos de dispersión consistentes con las metodologías establecidas para estimar la concentración, transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos relacionados con la actividad minera.</p> <p>b. Se deben tomar muestras representativas suficientes que evalúen si la calidad del aire de las instalaciones y su alrededor cumplen o no con lo establecido por los criterios de calidad del aire fijados por normativa.</p> <p>c. Se debe medir la deposición masiva de polvo, para lo cual se utilizarán captadores localizados entre la instalación y las propiedades cercanas que puedan verse afectadas por dicha deposición.</p> <p>3. Cumplimiento de la normativa de calidad de aire</p> <p>Se debe asegurar el cumplimiento de los niveles establecidos por la normativa marcada por la Unión Europea para calidad de aire en todas las operaciones mineras, y en las rutas de transporte asociadas a dichas operaciones.</p>	
Suelo			
Impactos	Requerimientos	Nivel de monitorización	
Minería superficial	<ul style="list-style-type: none"> - Cambio en el uso del suelo - Remoción de capa superficial - Remoción de subsuelo - Grietas en superficie terrestre - Deforestación - Reducción de área de agricultura 	<p>1. Plan de operación que provea de una descripción física de tallada de las instalaciones mineras, así como elementos geológicos e hidrológicos y físicos que pudieran afectar al diseño de las especificaciones.</p> <p>2. Balance de constituyentes tóxicos generados y almacenados procedentes de las operaciones de procesamiento de mineral.</p> <p>3. Residuos mineros</p> <p>a. Todos los residuos de las instalaciones mineras deben ser evaluados en función de su potencial para generar ácido y/o lixiviación de metales y para liberar contaminantes al agua.</p> <p>b. Todas las rocas minerales usadas para la construcción procedentes de instalaciones de residuos deben estar libres de contaminantes ácidos y de lixiviación de metales, y ser probadas antes de su uso como material de construcción.</p>	- Monitorización regional durante años/décadas
Minería subterránea	<ul style="list-style-type: none"> - Hundimientos - Alteración de la corteza terrestre 		

2.6 Factores limitantes en el cumplimiento normativo y problemática asociada

Una vez descritos los Programas de evaluación y seguimiento de la calidad de las aguas, que establece la normativa de aplicación actual, y expuestas las exigencias y condicionantes para su cumplimiento en el ámbito de la industria minera, se procede a evaluar las principales limitaciones que conllevan dichas técnicas convencionales de monitorización de la calidad de las aguas, los cuales serán factores determinantes en el cumplimiento normativo de la Evaluación de Impacto Ambiental de los proyectos.

Posteriormente, se describirá la problemática asociada a la inviabilidad de la gestión ambiental de la calidad de las aguas.

Como se ha visto en apartados anteriores, los indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad de las aguas se determinan tradicionalmente mediante la recopilación de muestras in-situ en diversas localizaciones puntuales situadas a lo largo de la zona de estudio (de forma automática y/o manual) y su posterior análisis en laboratorio [40].

A pesar de que los resultados arrojados ofrecen una alta precisión, se trata de procesos intensivos, que consumen mucho tiempo, e inadecuados para llevar a cabo un análisis simultáneo de la calidad de las aguas a escala regional.

Adicionalmente a lo anterior, la identificación de las variaciones espaciales y temporales en la calidad de las aguas de un emplazamiento resulta una tarea ardua de realizar mediante las técnicas de toma de muestras convencionales, lo cual es imprescindible en la gestión de las masas de agua de una determinada zona [40]. Ello se debe principalmente a que la recolección de datos en campo únicamente representa una estimación puntual (en tiempo y espacio) de los parámetros de calidad de las aguas a analizar, puesto que se llevan a cabo en determinados puntos de muestreo fijados.

A continuación, se resumen las principales limitaciones asociadas a los planes de vigilancia y monitorización actualmente llevados a cabo [40]:

- La toma de muestras in-situ y posterior análisis de los parámetros de calidad de las aguas son técnicas intensivas, costosas y cuyo análisis e interpretación de datos requiere mucho tiempo.
- El estudio e investigación de las variaciones espaciales y temporales para elaborar tendencias sobre la calidad de las aguas a escala global resulta prácticamente inviable.
- La monitorización, predicción y gestión de las masas de agua a gran escala puede resultar inaccesible debido a diversos factores tales como la situación topográfica de diversas zonas de estudio.
- Llevar a cabo una toma de muestras in-situ de forma exacta y precisa se ve limitada debido a los posibles errores en el muestreo de campo, así como en el análisis de muestras en laboratorio.

En definitiva, todas estas dificultades suponen un obstáculo en la implementación de programas efectivos de monitorización y gestión de la calidad de las aguas. Dentro del ámbito de las actividades mineras, estas limitaciones dan lugar a una serie de impactos medioambientales sobre la calidad de aguas, atmósfera y suelos, potenciando además los impactos ya existentes (Tablas 2-5 y 2-6). Con lo cual, resulta inviable la predicción de las posibles medidas de mitigación a tomar, así como el estudio de la evolución de las mismas una vez implementadas, resultando todo ello en el incumplimiento normativo de los Programas de Vigilancia Ambiental y, por tanto, en la anulación de EIA y de la autorización ambiental pertinente.

Así, la problemática asociada al incumplimiento normativo anteriormente recogido, en materia de impactos asociados a la calidad de las aguas, objeto de estudio del presente Proyecto, se basa en la generación de Drenaje Ácido de Minas (AMD). Se trata de un grave problema medioambiental a escala global, debido a la afección que ocasiona sobre la cuenca de ríos, lagos, estuarios y desembocadura de mares y océanos a lo largo del mundo. A continuación, se lleva a cabo una descripción general de la contaminación por aguas ácidas de mina, indicando

sus principales fuentes de generación, para finalmente dar una idea acerca de la magnitud de dicha problemática a nivel mundial.

El drenaje ácido de roca, conocido en sus siglas se inglés como ARD, es el resultado de la oxidación natural de los sulfuros metálicos expuestos a la intemperie, al entrar en contacto con el agua y el aire. En la naturaleza el sulfuro más común es la pirita (FeS_2), aunque suele acompañarse de otros sulfuros metálicos tales como calcopirita ($CuFeS_2$), galena (PbS), esfarelita (ZnS) o arsenopirita ($FeAsS$).

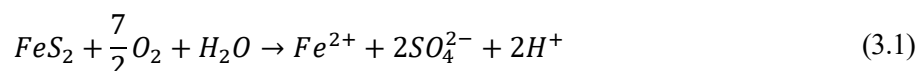
A pesar de que son estables y muy insolubles en las condiciones reductoras existentes en el subsuelo, la exposición de estos minerales a condiciones atmosféricas desestabiliza su estructura dando lugar a su oxidación.

Así, en el proceso de oxidación se liberan sulfatos, Fe, así como metales y metaloides, abundantes en este tipo de depósitos (tales como As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, etc.), generándose una elevada acidez.

El agente oxidante puede ser el oxígeno o el ion férrico (Fe^{3+}), y dependiendo de la ausencia o presencia de microorganismos que catalicen las reacciones de oxidación, se distingue entre la oxidación abiótica o biótica, respectivamente [41].

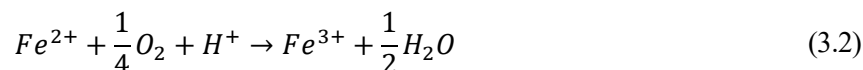
A continuación, se presenta una aproximación de los distintos procesos y reacciones que tienen lugar para llevar a cabo la oxidación de la pirita.

1. La **oxidación abiótica** de la pirita tiene lugar, de forma directa, cuando el mineral (FeS_2) entra en contacto con la atmósfera y el agua, produciéndose acidez de las aguas y librándose sulfatos y Fe^{2+} (Reacción 3.1), junto con otros elementos que acompañan a la pirita tales como As, Cd, Co, Ni, etc.

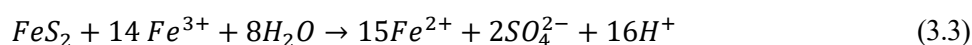


El factor oxidante en este caso es el oxígeno, cuya disponibilidad es un factor limitante en el caso en que la oxidación tiene lugar en un medio acuoso. Así, teniendo en cuenta que la concentración de oxígeno en agua es considerablemente inferior a la presente en la atmósfera, la oxidación de la pirita en medio acuoso es más lenta que en contacto con la atmósfera.

Posteriormente el ion ferroso (Fe^{2+}) liberado, en presencia de oxígeno, se oxida a férrico (Fe^{3+}), de acuerdo a la siguiente reacción.



La oxidación directa es seguida por una oxidación indirecta, cuyo poder es entre 20 y 200 veces superior a la directa, en la cual el agente oxidante es el ion férrico (Fe^{3+}) liberado previamente, viéndose incrementada por la oxidación bacteriana bajo condiciones de pH bajo [42] [43].(Reacción 3.3)



Esta reacción está controlada por la presencia de Fe^{3+} disuelto en agua, la cual depende del pH de la disolución. En soluciones neutras y alcalinas, la solubilidad del ion férrico es muy baja, favoreciéndose la oxidación directa. Asimismo, la reacción de oxidación indirecta implica la reducción de ion férrico a ferroso,

por lo tanto, indirectamente es necesaria la intervención del oxígeno para que se pueda producir.

En resumen, la oxidación indirecta de la pirita (Reacción 3.3) es mucho más rápida que la directa (Reacción 3.1) para valores de pH inferiores a 4. No obstante, la reacción que controla la disponibilidad de Fe^{3+} (Reacción 3.2) es muy lenta en estas condiciones siendo, por tanto, el factor limitante en la oxidación biótica. Esto hace que las reacciones sean muy lentas (sin la intervención de microorganismos).

2. La **oxidación biótica** de la pirita tiene lugar por acción de determinadas bacterias acidófilas, debido a que se desarrollan en condiciones de pH ácido. Estas bacterias actúan como catalizadores aumentando la velocidad de reacción considerablemente y obteniendo energía del proceso.

Este hecho favorece el aumento de la tasa de oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , produciéndose un incremento de la oxidación indirecta de la pirita (Reacción 3.3), mediante la cual se genera más Fe^{2+} que a su vez se oxida a Fe^{3+} produciéndose un ciclo de retroalimentación.

Si la oxidación es lenta, no se producen suficientes protones para acidificar el medio, por lo que no se dan las condiciones para el crecimiento de las bacterias y la tasa de reacción es lenta. No obstante, en condiciones ácidas las bacterias se desarrollan y la oxidación de sulfuros se incrementa exponencialmente.

Como se ha visto, el proceso de oxidación de sulfuros se produce de forma natural en la zona de yacimientos de sulfuros expuestos a la superficie, conocido como Drenaje Ácido de Roca (ARD). Por su parte, el elevado contenido de estos minerales en Au, Ag, Fe, Cu, etc., o la obtención de ácido sulfúrico han provocado su explotación y aprovechamiento a lo largo de la historia mediante actividades mineras [41].

En cada una de las etapas de la actividad minera (extracción, concentración, purificación y metalurgia extractiva) se generan residuos de extracción, de procesado y residuos metalúrgicos.

- Los residuos de extracción son aquellos extraídos para alcanzar la masa mineral, luego no contienen apenas cantidad de mineral deseado. Se caracterizan por elevada heterogeneidad, bajo contenido en sulfuros y suelen depositarse en escombreras.
- Los residuos del procesado de mineral son los obtenidos de las etapas de molienda, tratamientos físicos (lavado, separación por gravedad) y tratamientos químicos (adición de agentes químicos). Se trata de lodos formados por silicatos, óxidos, hidróxidos y carbonatos con elevado contenido en agua y presencia de sulfuros, los cuales son trasladados a balsas de decantación (tailings) o escombreras.
- Otros residuos derivados de los procesos de metalurgia extractiva tales como residuos de hidrometalurgia o pirometalurgia (en caso de minas abandonadas).

Así, la explotación de recursos mineros promueve el ARD ya que incrementa la superficie de sulfuros expuesta al aire y el agua. El producto de la oxidación es conocido como Drenaje Ácido de Mina (AMD), el cual se encuentra favorecido e incrementado por las siguientes operaciones llevadas a cabo en minería [41] [42].

- Escombreras, llevadas a cabo sobre todo en minería a cielo abierto, donde se depositan residuos de extracción de diferente tipo y tamaño, con contenido variable de sulfuros. El AMD se ve incrementado por la fragmentación de las rocas, aumentando la superficie expuesta a la meteorización.
- Balsas de residuos (tailings), donde son acumulados lodos piríticos procedentes principalmente de la molienda del mineral, lo cual los hace extremadamente susceptibles de sufrir oxidación.
- Excavación de cortas a cielo abierto, donde grandes cantidades de materiales son expuestos a condiciones atmosféricas, debido a la disminución del nivel freático mediante bombeo, para alcanzar grandes profundidades.
- Galerías y túneles subterráneos, donde el oxígeno penetra en su interior a través de grietas y fisuras, y oxida gran cantidad de sulfuros con los que entra en contacto.

- Plantas de fundición, generando escorias y otros residuos con alto contenido en sulfuro, y otros tratamientos y métodos de explotación empleados históricamente.

Los productos procedentes de las actividades mineras, en funcionamiento o clausuradas, son extraídos de los sitios mineros mediante corrientes de agua que percolan en el interior de rocas, o siendo filtrados en las aguas subterráneas, de modo que la contaminación se va propagando aguas abajo de la cuenca. De este modo, el Drenaje Ácido de Mina altera la caracterización hidroquímica de los cauces, lo cual conlleva a un deterioro en la diversidad y composición de comunidades biológicas, ocasionando impactos severos a largo plazo aguas abajo de los ecosistemas de agua dulce tales como ríos y lagos [42] [44] [45] [46] [47] [48] [49].

Además de poner en peligro la disponibilidad de agua dulce no contaminada, el Drenaje Ácido de Mina es una importante fuente de contaminación de los ecosistemas marinos, donde los metales pesados son eliminados de la afluencia de los ríos y atrapados en los sedimentos mediante procesos fisicoquímicos, con lo cual muchos estuarios se ven transformados en sumideros de contaminación minera [42] [50] [51]. Ello conlleva a cambios de larga duración en dichos estuarios, tales como pérdidas de biodiversidad, bioacumulación tóxica, modificaciones en la cadena trófica y eliminación de especies sensibles, perdiendo así su importante capacidad de suministro de servicios para la población [42] [52] [53] [54] [55] [56].

Por otro lado, los impactos ocasionados por el Drenaje Ácido de Mina suponen un problema medioambiental severo de carácter global, afectando a numerosos países alrededor del mundo. Así, se estima que solo en el año 1989, alrededor de 19.300 km de ríos a lo largo del mundo fueron afectados por AMD [42] [50] [57].

En el caso de Sudáfrica, las descargas de pirita asociadas a Drenaje Ácido de Mina, derivadas de la intensa actividad de extracción de oro, suponen uno de los mayores desafíos en cuanto a contaminación de las fuentes de agua dulce del país [42] [58] [48] [59]. Por su parte, en otros países en vías de desarrollo, tales como Ghana o Sierra Leona, la preocupación se centra en la contaminación de los ríos ocasionada por la minería a escala artesanal (ASM) así como las explotaciones de depósitos aluviales procedentes de minerales de titanio, lo cual afecta considerablemente la calidad del agua potable, así como actividades pesqueras [42] [60] [61].

Asimismo, las explotaciones mineras de oro a escala artesanal en la región amazónica de Brasil han afectado a la diversidad del fitoplancton, así como a la cuenca del río Tapajós; mientras que las actividades mineras de plata y cobre en Bolivia, Perú y Chile han contribuido a una pérdida de diversidad de los ecosistemas y a un incremento de la vulnerabilidad de las comunidades situadas aguas abajo de las explotaciones mineras [42] [62] [53] [63] [64].

Por su parte, en Estados Unidos, la generación de AMD procedente de minas abandonadas viene siendo un reto aún sin resolver, el cual se viene sucediendo desde los años 50. A este respecto, un estudio llevado a cabo por la EPA en el año 1986 concluye que un 10% de las corrientes en los Apalaches fueron contaminadas por Drenaje Ácido de Mina [42] [65].

En Europa, destaca la contaminación de estuarios por la influencia de metales pesados procedentes de minas desmanteladas, con mayor incidencia durante estaciones húmedas, la cual viene siendo reportada desde la década de los 70. En ese sentido, uno de los casos extremos de contaminación de estuarios por AMD es el estuario de Huelva también denominado estuario del Tinto y el Odiel. La carga contaminante transportada por la escorrentía hacia el estuario de Huelva se estima que contiene aproximadamente unas 140.000 t/año de sulfatos, 7.000 t/año de Fe, 5.000 t/año de Al, 3.000 t/año de Zinc y 1.500 t/año de Cu [42] [66] [57] [67] [41]. Así, la elevada carga contaminante a la que se expone el estuario hace que sea considerado como una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados de las aguas en España y del mar mediterráneo. Adicionalmente, se ha estimado que el sistema el Tinto-Odiel podría contribuir en un 8,1 % y un 1,6 % de los flujos globales disueltos de Zn y Cu, respectivamente [42] [68].

En resumen, los estuarios afectados por el Drenaje Ácido de Mina pueden recibir cargas sustanciales de contaminación durante décadas, incluso siglos, procedentes de sitios mineros en explotación, desmantelamiento o abandonados. Todo ello debido a la exposición permanente de los vertederos de rocas estériles, así como por inundación de pozos abiertos o túneles.

Teniendo en cuenta la magnitud y la complejidad que conlleva la problemática introducida en este apartado, se requerirá de una estrategia de monitorización eficaz, sistemática y continua, la cual ayude a cuantificar y caracterizar de manera fiable el impacto que genera el Drenaje Ácido de Mina en la calidad de los cursos de los

ríos.

Para ello, como alternativa al sistema tradicional de monitorización de la calidad de las aguas que viene siendo empleado en la actualidad, el cual ha sido descrito en epígrafes anteriores, en el presente Proyecto se pretende evaluar la aplicación de la observación satelital terrestre en la monitorización de la contaminación de las cuencas por Drenaje Ácido de Mina, llevándose a cabo medidas in situ de las sustancias indicadoras de este tipo de contaminación.

La potencial aplicación de la Teledetección en el ámbito de la monitorización de las aguas ha sido ampliamente evaluada desde la década de 1970, postulándose como la mejor alternativa para solventar las principales limitaciones de la monitorización tradicional de la calidad de las aguas. Estos sistemas están basados en mano de obra intensiva, en una toma de muestras costosa y lenta que, a su vez, no permite capturar simultáneamente datos de calidad de las aguas a escala regional, puesto que dichas medidas se encuentran restringidas espacialmente a mediciones puntuales [42] [69] [70] [71] [72] [73]

De este modo, la integración de los actuales sistemas de muestreo con los procedimientos de observación satelital supone un considerable avance en cuanto al desarrollo de sistemas integrales capaces de detectar de una manera más efectiva y eficiente las variaciones espacio-temporales de las condiciones de la calidad de las aguas.

Por tanto, el enfoque de la monitorización basada en técnicas de Teledetección puede proporcionar con el tiempo, una información sólida y robusta que permita establecer un seguimiento apropiado de los resultados obtenidos. Con ello, el objetivo principal de este sistema es el de proteger y mejorar la calidad de los recursos hídricos, así como mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos, de acuerdo a lo establecido en la Directiva Marco del Agua (DMA).

3 TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN SATELITAL TERRESTRE

En este Capítulo se llevará a cabo un análisis de las aplicaciones de las técnicas de Observación Satelital Terrestre (OST) aplicadas a la vigilancia y el control ambiental de la calidad de las aguas, en el ámbito de la industria minera. Para ello, se realizará una introducción en la cual se presentarán los fundamentos en los que se basa de la Teledetección, las características del espectro electromagnético, las diferentes partes en las que se compone un sistema de Teledetección y la clasificación de los distintos sensores.

Finalmente, se realizará una selección de diferentes sensores con aplicaciones para la monitorización de la calidad de las aguas.

3.1 Concepto de Teledetección

La Teledetección se define como la técnica de estudio de la superficie terrestre mediante imágenes tomadas desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre el sensor y la Tierra existe una interacción energética, bien sea, como se verá posteriormente, por reflexión de la energía solar, de un haz energético artificial o por emisión propia [74].

Así, la Teledetección en el contexto de la monitorización ambiental, puede ser descrita como la adquisición de datos de áreas de la superficie terrestre, en forma de imágenes o señales obtenidas midiendo y registrando la radiación electromagnética de dichas zonas. Todo ello la convierte en una poderosa herramienta para adquirir información sobre los cambios, actividades y procesos que ocurren sobre la superficie de la Tierra. Entre las ventajas principales que posee esta técnica se encuentra su capacidad para obtener información de áreas extensas, así como de zonas inaccesibles o de difícil acceso [38].

En cualquier caso, es necesaria que la radiación electromagnética registrada por el sensor sea almacenada y transmitida a estaciones receptoras, para poder ser interpretada. Con lo cual, la Teledetección no solo engloba el proceso de adquisición de la información, sino también el trabajo posterior de procesamiento, análisis e interpretación, hasta ser recibida por los usuarios finales.

3.2 Principios de la Teledetección

Como se ha visto con anterioridad, cualquier sistema de Teledetección ha de contar con un sensor, una superficie observada y un flujo de energía entre ambos, lo cual sirva de discriminante entre los diferentes tipos de superficie. En el caso del flujo de energía que se establece con la superficie, este es dependiente de cada sensor, distinguiéndose entre los distintos tipos de flujo [74].

- a) El flujo por reflexión es el flujo procedente del reflejo que produce la luz solar cuando incide sobre la superficie de estudio.
- b) El flujo por reflexión-emisión, se produce cuando el propio sensor emite y capta la onda una vez reflejada en la superficie de estudio.
- c) El flujo por emisión se produce cuando un dispositivo situado en la superficie emite una señal al espacio la cual es captada por el sensor.

Cualquiera de los flujos de energía anteriormente expuestos constituye una forma de radiación electromagnética la cual se transmite por radiación, entendida como la energía procedente de una fuente en forma de ondas.

De esta forma, partiendo de la base de que cualquier objeto contiene una cierta cantidad de radiación y, a su vez, es capaz de reflejar la radiación procedente de otros objetos, las técnicas de Teledetección se basan en medir la energía reflejada y emitida por diferentes objetos.

La transferencia de energía desde un objeto a otro está gobernada por ondas electromagnéticas, las cuales se caracterizan por su longitud de onda, amplitud y frecuencia. La longitud de onda se define como la distancia entre dos crestas consecutivas; la amplitud es la altura de la cresta; mientras que la frecuencia es el número de repeticiones por unidad de tiempo, siendo esta inversamente proporcional a la longitud de onda. Esto es, al aumentar la longitud de onda disminuye la frecuencia, y viceversa [38].

3.2.1 El espectro electromagnético

Una serie de ondas electromagnéticas conforma el espectro electromagnético, el cual está expresado en forma de regiones de longitudes de onda continuas. No obstante, se establecen una serie de bandas donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. Así, el espectro comienza con longitudes de onda larga y baja energía de ondas de radio, y se va extendiendo hacia ondas cortas, con alta energía de rayos gamma. Ello se basa en la Ley de Planck, por la cual se establece que los mayores niveles de energía son obtenidos conforme disminuye la longitud de onda.

Por otro lado, la radiación electromagnética es emitida por un cuerpo incandescente, lo cual hace que sus propiedades físicas dependan de la temperatura de dicho cuerpo, de tal modo que una alta temperatura de la fuente de emisión se corresponde con altos niveles de energía y, por consiguiente, elevadas frecuencias de onda (o baja longitud de onda).

A continuación, la Figura 3-1 muestra la relación existente entre la temperatura con el máximo de radiación emitida [75].

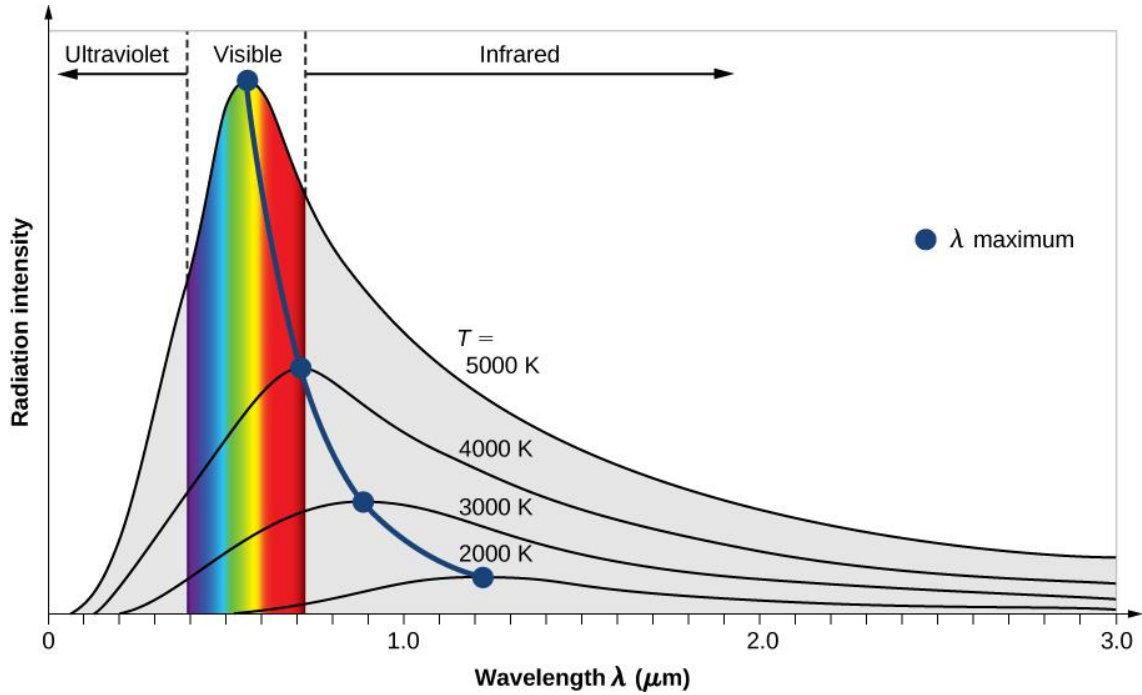


Figura 3-1. Relación entre la temperatura y la intensidad de radiación emitida [38].

Se observa como la intensidad máxima de radiación emitida por un cuerpo a la temperatura del Sol (aproximadamente 5000 K) se encuentra dentro del rango del espectro visible. Así, conforme disminuye dicha temperatura el máximo de intensidad se traslada hacia el espectro infrarrojo.

A continuación, en la Figura 3-2 se presenta un esquema representativo del espectro electromagnético.

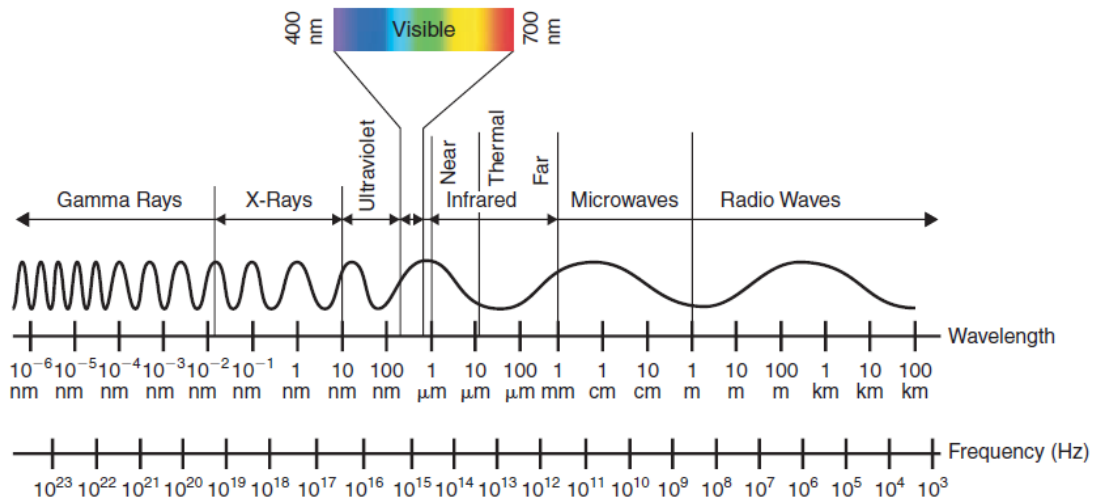


Figura 3-2. Esquema del espectro electromagnético y su relación con longitudes de onda y frecuencia [38].

En el ámbito de la Teledetección, las bandas espectrales de mayor aplicación son las visibles, infrarrojas y microondas. A continuación, se describen cada una de las regiones.

- a) Ultravioleta (UV: 0,01-0,4 μm): La luz solar es la principal fuente de radiación ultravioleta. El rango de mayor interés para la TD es el de 0,34-0,4 μm y se usa principalmente para aplicaciones de vigilancia oceánica.
- b) Espectro visible (VIS: 0,4-0,7 μm): Este tipo de radiación es la única capaz de percibir por el ojo humano. Este espectro se clasifica en tres franjas: azul (0,4-0,5 μm), verde (0,5-0,6 μm) y rojo (0,6-0,7 μm).
- c) Infrarrojo cercano (NIR: 0,7-1,3 μm): Esta región resulta de gran interés para la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad, debido a que presenta picos de reflectancia en este intervalo del espectro.
- d) Infrarrojo medio (SWIR: 1,3-8 μm): Esta región del espectro se entremezclan los procesos de reflexión solar en objetos y la emisión de energía desde la superficie terrestre. Resulta de utilidad para estimar la humedad (1,3-2,5 μm) y para la detección de focos de temperatura como incendios o erupciones volcánicas (2,5-8 μm).
- e) Infrarrojo lejano o térmico (TIR: 8-14 μm): en esta franja de longitudes de onda se detecta el calor procedente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- f) Microondas (1 mm-1 m): Esta región del espectro electromagnético resulta de especial interés debido a que se trata de una energía muy transparente a la atmósfera terrestre. Por tanto, se utiliza cuando es el propio censo quien emite y recibe la radiación (tipo radar).

En definitiva, el objetivo principal es que el sensor capte la radiación reflejada o, en su caso, emitida por la superficie terrestre con las mínimas interferencias posibles, para lo cual se deberá elegir cuidadosamente el rango del espectro electromagnético adecuado para el estudio [75].

3.2.2 Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera

Independientemente de la fuente de energía electromagnética, en el ámbito de la Teledetección resulta de gran importancia conocer la interacción que existe entre ambas, teniendo en cuenta que la energía electromagnética ha de atravesar la atmósfera, lo cual provoca cambios en sus características de acuerdo a tres factores íntimamente ligados: la absorción, la dispersión y la transmisión.

Por un lado, existen regiones atmosféricas que **absorben** gran cantidad de radiación electromagnética, lo cual impide que incida sobre la superficie terrestre. Ello es debido a la presencia de una serie de gases atmosféricos: el ozono (elimina la energía ultravioleta inferior a 0,3 μm), el dióxido de carbono (absorbe el TIR > 15 μm , y el MWIR 2,5-4,5 μm) y el vapor de agua (absorbe longitudes de onda de 6 μm , y afecta a las comprendidas entre 0,6-2 μm). Por tanto, los sensores se diseñan de modo que sean capaces de captar las regiones del espectro donde la atmósfera presenta menor absorción. Estas franjas, donde se produce una mayor transmisión de energía a través de la atmósfera, se conocen como ventanas atmosféricas, las cuales se presentan en la siguiente Figura.

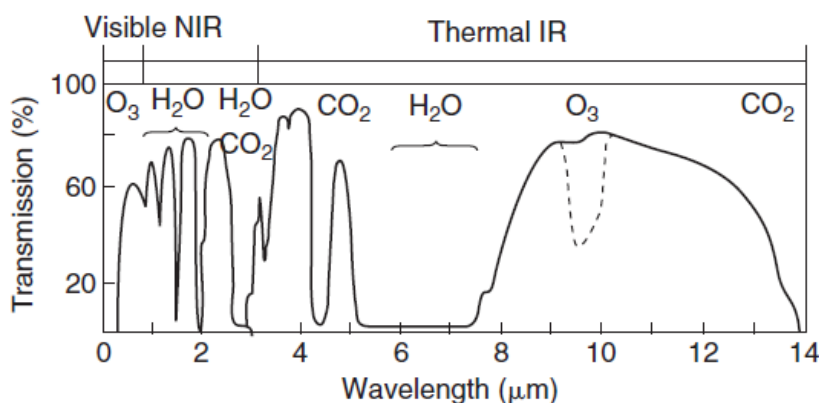


Figura 3-3. Evolución de la transmisión de energía a través de la atmósfera de diferentes parámetros con respecto a las longitudes de onda del espectro electromagnético [38].

Cabe destacar que, mientras que las concentraciones de O_3 y CO_2 son relativamente constantes en la atmósfera, la concentración de vapor de agua varía en función del espacio y el tiempo. Así, en áreas donde el clima es húmedo, como bosques y selvas, hay mayores concentraciones de vapor de agua que en zonas áridas, como desiertos, donde la concentración de vapor de agua es mínima [38].

Adicionalmente a la absorción de la radiación por los gases atmosféricos, las nubes suponen una importante barrera que impide la transmisión de energía entre la superficie y el sensor.

Por otro lado, a la energía que pasa directamente a través de las ventanas atmosféricas se la conoce como **transmisión**. En este sentido, la capacidad de un objeto con un determinado espesor a transmitir la energía electromagnética se expresa a través de la transmitancia, la cual se define como el ratio de energía transmitida entre la energía total incidente.

Finalmente, en el proceso de transmisión de energía se puede dar el fenómeno de la **dispersión** atmosférica, el cual se produce por un cambio direccional en la dirección de la energía al atravesar un determinado elemento, debido a la presencia de partículas (polvo, humo, vapor de agua, etc.). El grado de dispersión depende de una serie de factores tales como el tamaño y densidad de partícula, la longitud de onda o el espesor de la atmósfera donde se produce la radiación [38]. De este modo, la interacción de la radiación electromagnética con las partículas en suspensión presentes en la atmósfera causa tres tipos de dispersión: la dispersión de Rayleigh, la dispersión de Mie y la dispersión no selectiva. La dispersión de Rayleigh se produce cuando el tamaño de partículas en suspensión en la es considerablemente inferior a la longitud de onda. La dispersión de Mie es la que se produce cuando el tamaño de partículas suspendidas en la atmósfera es de gran tamaño, alcanzando el mismo tamaño que las longitudes de onda correspondientes al espectro visible y NIR. Por su parte, la dispersión no selectiva ocurre cuando el tamaño de partículas atravesadas por la radiación es considerablemente superior a la longitud de onda de la misma.

Como se ha podido comprobar, resulta ser de gran importancia conocer el comportamiento de la atmósfera, para poder minimizar las interferencias que ocasiona cuando se interpone entre el flujo energético que va desde la superficie, y el sensor encargado de captarlo.

3.2.3 Interacción de la radiación electromagnética con los objetos presentes en la superficie terrestre

Una vez que la energía electromagnética atraviesa la atmósfera e incide sobre los objetos de la superficie terrestre, esta puede ser reflejada, absorbida o transmitida.

La absorción y transmisión son los fenómenos expuestos con anterioridad en el epígrafe anterior, mientras que

la reflexión se define como el cambio de dirección de la onda al incidir sobre una superficie opaca.

De este modo, la fracción de energía que se refleja es la reflectancia, la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad, y la que se transmite se conoce como transmisividad. La suma de ellas constituye la energía total que recibe el objeto incidente, mientras que, la tendencia a reflejar, absorber o transmitir la energía dependerá de una serie de factores tales como las características del objeto de estudio, la longitud de onda de la energía incidente y el ángulo en el cual la fuente de energía incide sobre el objeto.

Así, la forma en la que se emite, absorbe, refleja y transmite la energía desde superficies como el suelo, la vegetación, el agua, etc., permiten ser detectados mediante técnicas de Teledetección. Debido a la gran cantidad de estudios realizados para analizar el comportamiento de estos elementos se tiene un registro de datos e información acerca de la reflectancia, transmisividad y absorptividad acumulada durante décadas. Asimismo, se han estudiado el comportamiento y propiedades de una serie de elementos a diferentes longitudes de onda. Todo ello representa el comportamiento espectral de cada elemento, lo cual da lugar a una firma espectral característica que lo identifica. La firma espectral se representa a través de las curvas de reflectancia espectral, a partir de las cuales se puede identificar la técnica más adecuada de Teledetección para cada elemento de la superficie terrestre.

A continuación, en la Figura 3-4 se muestran las curvas de reflectancia espectral para agua, desierto, suelo, nieve y vegetación.

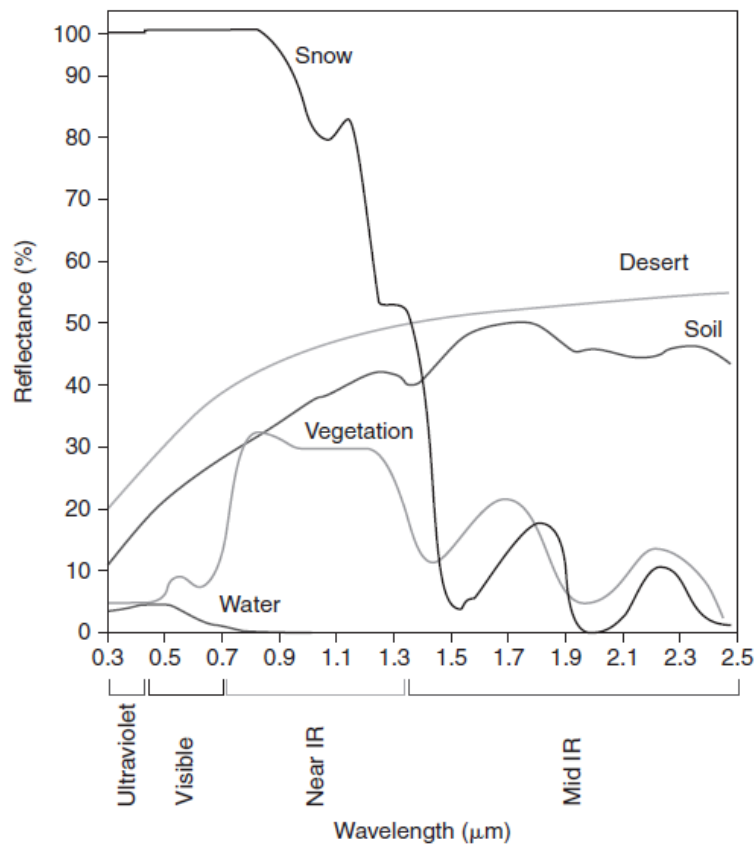


Figura 3-4. Curvas de reflectancia espectral de diferentes elementos situados sobre la corteza terrestre [38].

En la Figura anterior se representa la variación de la reflectividad en superficie de un determinado elemento en función de la longitud de onda de la radiación incidente. Como puede observarse, cada tipo de elemento tiene un comportamiento distinto al resto. Por ejemplo, mientras que la nieve alcanza su máximo de reflectancia en torno a 0,5-1 μm, el agua no presenta reflectancia a partir de longitudes de onda superiores a 0,8 μm. Cabe destacar que, las curvas de reflectancia presentadas son para condiciones ideales en las que no existe ninguna perturbación, lo cual quiere decir que en situaciones en las que exista algún tipo de impureza, las características se verán modificadas generándose curvas distintas.

3.3 Componentes de un Sistema de Teledetección

Teniendo en cuenta el concepto de Teledetección expuesto en apartados anteriores, cuando se habla de un sistema de Teledetección se hace referencia a una serie de elementos que posibiliten la captación de la radiación por parte de un sensor situado sobre una plataforma de terminada, para posteriormente transmitir y almacenar la información, e interpretarla de manera comprensible hasta llegar al usuario final. A continuación, se describen los elementos que conforman dicho sistema de Teledetección y las interacciones que tienen entre sí [74].

- a) Una **fuerza de energía** dependiente de la temperatura que origina la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse del propio sensor, que emita y capte la energía, o de una fuente de energía externa como es la luz solar.
- b) La **cubierta terrestre** formada por los distintos elementos que la componen, entre los cuales se distinguen las masas de agua, materia vegetal, suelo desnudo, etc.
- c) Un **sistema sensor** compuesto por el propio sensor y la plataforma donde se encuentra situado, el cual se encarga de captar la energía reflejada procedente de la corteza terrestre.
- d) Un **sistema de recepción de la información** el cual se encuentra sobre la superficie terrestre. Se encarga de recibir la información transmitida por el sensor y almacenarla.
- e) Un **intérprete** encargado de convertir la información almacenada en datos de interés, facilitando su posterior utilización por parte de usuario final.
- f) Un **usuario final** encargado de escrutar la información obtenida y sacar unas conclusiones a raíz del estudio.

A continuación, se muestra un esquema representativo con todos los componentes del sistema de Teledetección anteriormente descritos y las interacciones entre sí.

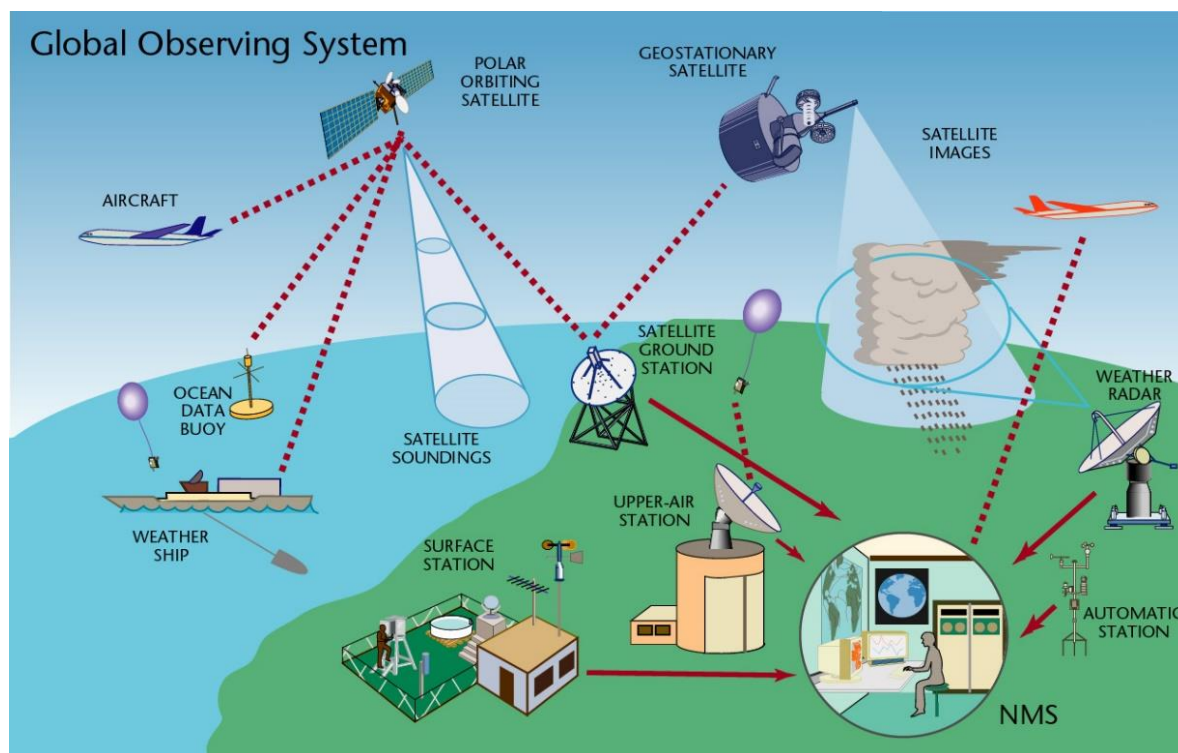


Figura 3-5. Esquema representativo de un Sistema de observación global mediante Teledetección [76]

3.4 Clasificación de los sistemas de Teledetección

Los sistemas de Teledetección se pueden clasificar atendiendo a tres criterios principalmente: según la plataforma sobre la cual se sitúe el sensor de captación, según el tipo de sensor y según su capacidad para registrar la reflectancia espectral y la resolución espacial. A continuación, se describen los diferentes tipos en los que se clasifica cada uno.

3.4.1 Clasificación según la plataforma donde se sitúe el sensor

La observación de la corteza terrestre se puede llevar a cabo a diferentes distancias y desde diferentes plataformas, sobre las cuales se sitúan los sensores. Se distingue entre plataformas terrestres, aerotransportadas y satelitales [38] [77].

- a) Los sensores situados sobre **plataformas terrestres** se utilizan cuando se requiere obtener información de áreas de tamaño reducido, obteniéndose datos de elevada precisión y buena calidad, debido a que no se encuentran afectados por interacciones atmosféricas [38]. Este tipo de sensores pueden ser utilizados manualmente o colocarse sobre una estructura fija como un edificio o torre, mientras que los instrumentos utilizados son cámaras digitales, cámaras infrarrojas térmicas o cámaras hiperespectrales. Un ejemplo de este tipo de Teledetección es la espectroscopía de campo, la cual consiste en la observación de objetos o vegetación con un rango del espectro comprendido entre 400-2500 nm. Cabe destacar que, esta técnica de Teledetección junto con observaciones de campo y análisis de muestreo son utilizadas para calibrar, analizar e interpretar sensores satelitales y aerotransportados.
- b) Los sensores a bordo de **plataformas aéreas** se sitúan sobre vehículos aéreos tripulados o VAT (aviones, helicópteros, etc.) o no tripulados VANT (drones). Los instrumentos situados a bordo van desde cámaras digitales de alta resolución hasta fotografía aérea, con cámaras especializadas en el NIR, en imágenes hiperespectrales, RADAR, LIDAR, o instrumentos geofísicos (magnetómetros, espectrómetro de rayos gamma, etc.). Algunos de estos instrumentos resultan ser de gran tamaño por lo que solo pueden situarse sobre aeronaves tripuladas, no obstante, se están desarrollando cada vez con mayor frecuencia instrumentos de menor tamaño.
Por lo general, los sensores ópticos aéreos presentan una mayor resolución espacial que los satelitales y pueden obtener información cuando sea necesario. Otra ventaja de este sistema es que se reducen las interferencias provocadas por la atmósfera y la cobertura de nube. Por su parte, algunas de las desventajas con respecto a la Teledetección satelital es su elevado coste (sobre todo si son tripulados), su limitada cobertura y una reducida estabilidad de la plataforma.
- c) Los sensores a bordo de **plataformas espaciales** generan información relativamente poco costosa y de buena calidad, teniendo en cuenta que obtienen datos para áreas extensas de la superficie terrestre con una resolución espacial variable (puede ir desde pocos metros a cientos de kilómetros). No obstante, estos datos requieren de un elevado nivel de procesamiento puesto debido a la influencia de efectos atmosféricos y problemas de transmisión de la información a las estaciones de medida. Los sensores ópticos que conforman esta tipología serán descritos en apartados posteriores.

3.4.2 Clasificación según la Fuente de radiación

Según la procedencia de la fuente de radiación los sensores se clasifican en activos o pasivos.

- a) Los **sensores pasivos** (Figura 3-6.a) son aquellos capaces de captar la energía electromagnética procedente de la superficie terrestre, ya sea producto de la reflexión que ejerce la radiación solar o emitida desde focos a elevada temperatura. De este modo se consideran sensores pasivos los sensores fotográficos, los radiómetros multiespectrales e hiperspectrales y los espectrómetros de imagen. La ventaja principal que ofrecen radica en la sensibilidad espectral, que posibilita la obtención simultánea de información de diferentes bandas espectrales, lo cual permite discretizar el espectro [75].
- b) Los **sensores activos** (Figura 3-6.b) son aquellos que emiten un haz electromagnético, para posteriormente captar la reflexión que ejerce dicha radiación sobre la superficie de observación. Por tanto, estos sensores requieren la generación de una gran cantidad de energía. No obstante, son capaces de obtener medidas en cualquier momento, independientemente del día o estación. Adicionalmente, los sensores activos pueden trabajar en rangos del espectro electromagnético que la energía solar no alcanza, tales como microondas o láser [38].

Para aplicaciones de Teledetección, los sensores activos se clasifican en sensores RADAR, que operan en el rango de las microondas; y sensores LIDAR, los cuales emiten pulsos de luz polarizada entre el UV y el TIR. Estos últimos permiten obtener un mayor detalle en la observación que los RADAR, debido a que se mueven en longitudes de onda inferiores. No obstante, presentan el inconveniente de que el láser no es capaz de atravesar las nubes, con lo cual estos sensores suelen colocarse a bordo de aviones [78].

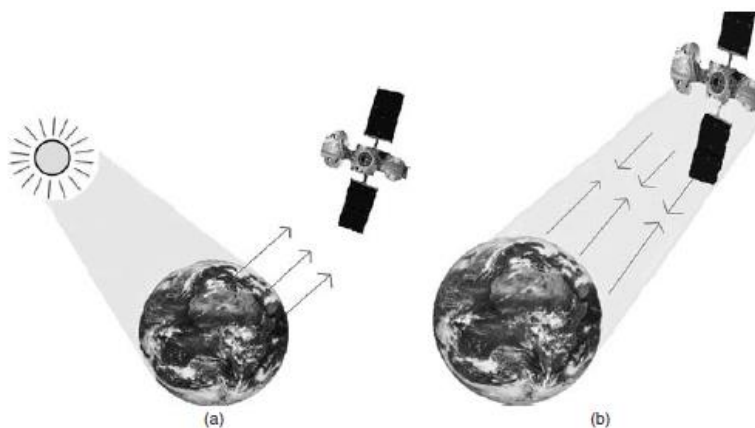


Figura 3-6. Sensores pasivos (a) y sensores activos (b) [38].

3.4.3 Clasificación según la resolución espacial y espectral del sensor

Según su resolución espacial y espectral los sensores se clasifican en pancromáticos, multispectrales e hiperspectrales.

- a) Los **sensores pancromáticos** son aquellos que capturan información de una sola banda, la cual se sitúa entre el espectro visible y el NIR (0,5-0,9 μm) a una elevada resolución espacial. Las imágenes obtenidas se suelen encontrar en escala de grises [77] [78].
- b) Los **sensores multispectrales** son aquellos que capturan información en varias bandas espectrales (típicamente ente 3-12) las cuales se suelen corresponder con longitudes de onda del espectro visible (azul, verde, rojo) y del NIR [77] [78].
- c) Los **sensores hiperspectrales** son capaces de captar información espectral de mayor precisión ya que utilizan cientos de bandas con estrecho rango espectral.

3.5 Análisis y procesamiento de imágenes captadas por sensores de observación satelital

Como se ha ido viendo a lo largo de los apartados anteriores, los instrumentos utilizados por los sistemas de Teledetección son sensores electrónicos encargados de recoger la radiación reflejada (o emitida) por los elementos situados sobre la superficie terrestre. Esta energía recibida por el sensor puede ser obtenida de manera fotográfica o electrónica: en el primer caso, la energía electromagnética es recopilada en películas fotográficas que reaccionan químicamente con la energía electromagnética en forma de luz, la cual va siendo almacenada de forma analógica. Por su parte, en el segundo caso las señales eléctricas generadas por las variaciones de energía electromagnética para determinada vista son recogidas y almacenadas, siendo los datos obtenidos de tipo digital. En cualquier caso, cualquiera de los formatos puede ser convertido al otro, es decir, los datos digitales pueden ser recopilados en películas fotográficas obteniéndose datos analógicos, así como los datos analógicos pueden ser transformados en datos digitales mediante detectores [38]. Generalmente, la obtención de datos analógicos suele ser fácil y poco costosa, proporcionando una alta resolución espacial e integridad geométrica; mientras que los datos digitales suelen proporcionar elevada resolución espectral, posibilitando un mejor almacenamiento y capacidad de transmisión [79].

3.5.1 Imágenes en bruto

Una imagen digital en bruto, es decir, tal y como es recibida por el usuario final, consiste en una serie de elementos de imagen del mismo tamaño denominados píxeles (Figura 3-7). En cada uno de los píxeles se recopila la radiancia emitida por cada objeto situado sobre la superficie terrestre en forma de niveles digitales (DN).

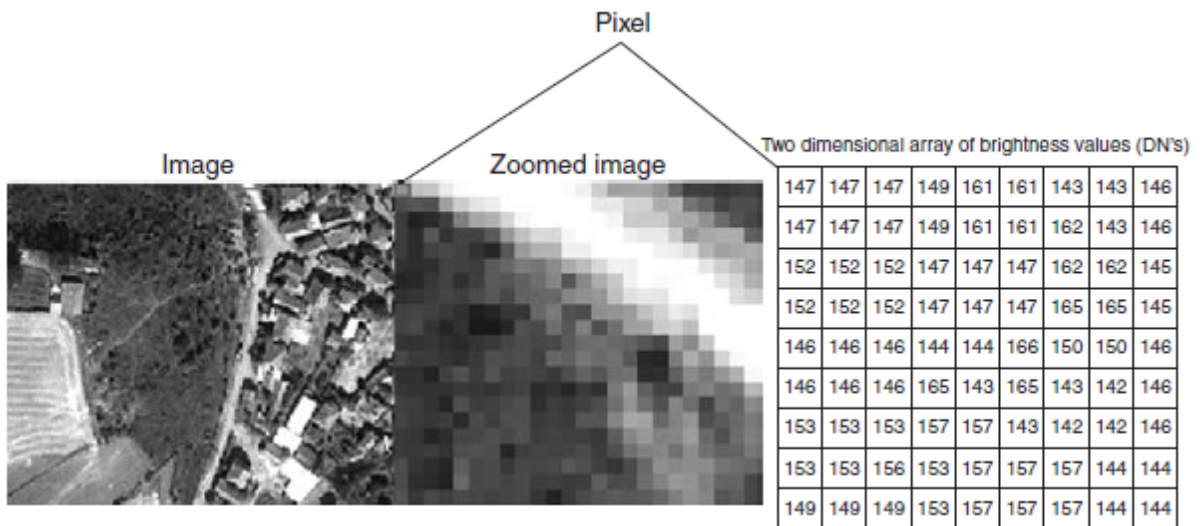


Figura 3-7. Obtención de la matriz con los niveles digitales (DN) a partir de la imagen en bruto [38].

Cada píxel contiene dos tipos de información: espacial y espectral. Por un lado, el tamaño de píxel proporciona la información espacial correspondiente a la cobertura de área estudiada. Por otro, la respuesta espectral de un elemento de la superficie terrestre para un rango del espectro electromagnético dado supone la información espectral, registrada en una escala de valores en forma de Niveles digitales (DN).

3.5.2 Tipos de resoluciones

La resolución de un sensor es la capacidad que tiene para poder discriminar y obtener información con gran detalle de la superficie terrestre, teniéndose en cuenta factores tales como el tiempo que transcurre hasta volver a tomar una imagen de la misma zona, su capacidad para captar una imagen desde diferentes ángulos o para discriminar entre las diferentes bandas electromagnéticas. Cada factor expuesto corresponde a un tipo de resolución, entre las cuales se distinguen cuatro: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- a) La **resolución espacial** viene determinada por el tamaño de píxel, considerado como el tamaño del objeto más pequeño que se puede distinguir sobre una imagen. Por tanto, considerando una malla cuadrada imaginaria superpuesta a la superficie terrestre en la cual cada celda es un píxel, el mínimo tamaño de la celda que puede discriminarse es lo que se conoce como resolución espacial [79]. Existe un amplio rango de resoluciones espaciales en los satélites, que pueden ir desde centímetros (satélites de muy alta resolución espacial) hasta kilómetros (satélites meteorológicos) [78]. Así, una alta resolución espacial conlleva a un tamaño de píxel pequeño que contiene un nivel de detalle de la superficie terrestre elevado, y viceversa. A partir de la resolución espacial se define el tipo de elementos que pueden ser detectados mediante Teledetección, dependiendo de factores como las propiedades de dichos elementos y su alrededor, la escala de imagen y el potencial del sensor, así como las condiciones atmosféricas y de iluminación [74].
- b) La **resolución espectral** indica el número y ancho de bandas en las que el sensor es capaz de detectar la radiación electromagnética, de tal modo que la resolución espectral se ve incrementada conforme aumenta el número de bandas que es capaz de detectar el sensor y conforme disminuye el ancho de banda de las mismas, lo cual incrementa el poder discriminante del sensor [38] [78] [79].
- c) La **resolución radiométrica** indica la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad para discriminar pequeñas variaciones en la radiación que capta. Para equipos digitales, la imagen se codifica en formato binario, correspondiendo la resolución radiométrica con el rango posible de valores que puede adoptar un píxel, el nivel de números digitales (DN). Se expresa mediante el número de bits con los que se almacena la información de cada celda, pudiendo tomar valores comprendidos entre 0 y 2^n , donde n es el número de bits de profundidad [38] [79]. Así, cuanto mayor sea la resolución radiométrica mayor número de detalles se pueden distinguir en una imagen, lo cual se traduce en un mayor número de niveles de gris en la escena [79].
- d) La **resolución temporal**, también conocida como tiempo de revista, se refiere a la frecuencia con la que el sensor capta imágenes de la misma zona geográfica de estudio. Una alta resolución temporal está referida a una alta frecuencia en la obtención de imágenes en un corto periodo de tiempo transcurrido entre las visitas de la misma área. La resolución temporal requerida varía en función de las características del estudio que se vaya a realizar. De este modo, se suele precisar una alta resolución temporal para estudiar fenómenos cuyas condiciones cambien rápidamente [38]. Cabe destacar que, de forma general, una mayor resolución espacial conlleva una disminución de las resoluciones temporal y espectral, lo cual se está solventando con la aparición de nuevos satélites orientables que compatibiliza ambas resoluciones [78].

3.5.3 Preprocesamiento de la imagen

Se trata de la fase previa a la interpretación de las imágenes, la cual consiste en la extracción de los datos de interés de las imágenes captadas. La fase de preprocesamiento consiste en tres niveles: en primer lugar, se lleva a cabo una corrección geométrica y radiométrica; posteriormente se requiere una mejora o realce de la imagen y finalmente se lleva a cabo una transformación de la imagen. La necesidad de cada etapa del preprocesamiento dependerá del tipo de producto suministrado por el proveedor y de la naturaleza de la interpretación de la imagen que se requiera [38] [78] [79].

a) Corrección radiométrica y geométrica

Cada píxel en que se divide una imagen corresponde a un área sobre la superficie terrestre, la cual presenta una cierta posición en forma de coordenadas. No obstante, dichas coordenadas iniciales suelen contener una serie de errores que conllevan a distorsiones geométricas de las celdas, los cuales han de ser corregidos puesto que las coordenadas de los elementos de estudio no se corresponden con su localización real. Estas distorsiones pueden deberse a que parámetros de la cámara, tales como la inclinación o la velocidad de la plataforma, pueden no permanecer constantes durante el proceso.

Para llevar a cabo la corrección geométrica, se lleva a cabo una transformación matemática de las coordenadas iniciales de cada píxel para obtener la localización real de los mismos. Esta transformación requiere un cambio en los centros de los píxeles, lo cual conlleva a una nueva asignación de niveles radiométricos (DN) para cada nuevo centro, lo cual se conoce como remuestreo.

Así, la corrección radiométrica consiste en la compensación y eliminación de los errores en los niveles radiométricos (DN). Estos errores ocurren como consecuencia de fallos en el sistema sensor o debido a efectos atmosféricos. En el primer caso, los nuevos sensores suelen eliminar este tipo de errores, sin embargo, los efectos atmosféricos suelen ser recurrentes, generando una disminución en la calidad de las imágenes. Por tanto, su corrección resulta de gran importancia, pudiendo ser solventados mediante el desarrollo de algoritmos de mejora de imagen.

b) Realce de imagen

Esta etapa de preprocesamiento de la imagen consiste en una mejora de la calidad visual de la imagen mediante un incremento del contraste y variabilidad de los niveles numéricos (DN) de los píxeles, los cuales suelen ser bastante pobres en la imagen inicial, especialmente en sensores satelitales.

c) Transformación de la imagen

El objetivo de la transformación de la imagen es proporcionar información adicional para facilitar la interpretación posterior utilizando análisis de imágenes digitales, así como técnicas visuales. Así, las imágenes una vez transformadas pueden ser útiles en la interpretación directa de resultados, así como resultado intermedio en el proceso completo. Los métodos de transformación se dividen en dos categorías según si se usa una sola banda de la imagen o si se utilizan múltiples bandas, siendo el más usado el método de transformación de una banda, el cual consiste en extraer medidas de textura que son propiedades inherentes a los datos de imagen.

3.5.4 Interpretación de la imagen

Con objeto de extraer la información requerida de las imágenes captadas por satélite, será necesario realizar una interpretación de dichas imágenes. Para ello existen dos tipos de interpretación: para imágenes con alta resolución espacial se puede llevar a cabo una interpretación visual, mientras que para imágenes captadas a longitudes de onda fuera del espectro visible serán necesarios métodos de análisis de imagen.

a) Interpretación visual de la imagen

Consiste en un análisis integral de las características específicas de cada objeto situado sobre la superficie de la Tierra, las cuales son definidas a continuación [38].

- La **forma** define la superficie externa del objeto.
- El **tamaño** da información sobre las dimensiones del objeto.
- El **tono** expresa el color de los objetos.
- La **textura** proporciona el resultado de las variaciones entre los tonos de los píxeles.
- El modelo o patrón refleja la información sobre la configuración espacial de los objetos.
- La **sombra** proporciona información de la forma, tamaño y altura de los objetos, condiciones de iluminación y tipo de terreno.
- La **asociación** se refiere a la localización de ciertos objetos con respecto a otros.

b) Interpretación de imagen basada en un análisis digital

Los análisis digitales de imágenes se basan en la interpretación de imágenes mediante el desarrollo de una serie de algoritmos basados en los siguientes procedimientos [38].

- Una **clasificación** de los elementos situados sobre la superficie terrestre, la cual se basa en un proceso de identificación y extracción de información de las firmas espectrales, asignado a los diferentes píxeles, una serie de categorías basadas en las firmas espectrales similares. Las diferentes categorías pueden ser agua, agricultura, urbanismo, desierto, montaña. La clasificación puede ser supervisada o no supervisada. En la supervisada, el analista selecciona un área de la imagen de pequeño tamaño (muestra) representativa de cada categoría, a partir de la cual se extrapolan las propiedades para el resto de las partes no clasificadas de la imagen. Por su parte, la clasificación no supervisada es un proceso automático, que no requiere de intervención por parte del analista.
- Un **análisis de cambio** que consiste en comparar al menos dos imágenes por satélite obtenidas en diferente periodo de tiempo haciendo uso de algoritmos que pueden ser de dos tipos: uno de ellos compara el ratio de bandas espectrales entre dos o más imágenes en bruto; mientras que el otro algoritmo compara factores resultantes de varias imágenes ya procesadas tales como el índice de vegetación, resultados de clasificación, etc.
- El **modelo digital de elevación (MDE)** se obtiene principalmente mediante la elevación de ciertos puntos del terreno sobre la imagen, así como la interpolación de los valores de alturas para crear una superficie continua de elevación.

3.6 Sensores de Teledetección ambiental para el control de la calidad de las aguas

Para llevar a cabo una selección de un sistema de Teledetección para un determinado ámbito de estudio, resulta fundamental tener un conocimiento previo de las características fundamentales de cada sensor. Por tanto, una vez abordada la fase introductoria a la Teledetección ambiental, en la cual se han descrito los principios físicos en los que esta se sustenta, los principales componentes que presenta el sistema, así como la tipología de sensores que existen, se procede a presentar una selección de aquellos sensores que actualmente se utilizan para la vigilancia de la calidad de las aguas, incluyendo las características propias de cada uno de ellos.

Así, de acuerdo con la clasificación establecida en el apartado anterior, se hará distinción entre los sensores satelitales y los aerotransportados.

3.6.1 Sensores de observación satelital

Los satélites de observación de la tierra se distinguen en función de una serie de aspectos fundamentales tales como la órbita que describen, el tipo de sensor que transportan, los tipos de resolución o el ancho de barrido que son capaces de proporcionar. Así, dependiendo de la aplicación a la que va destinada una determinada misión, se definen los parámetros del satélite seleccionado para la misma.

Cabe destacar que, a pesar que la mayoría de Programas de observación satelital surgen de iniciativas públicas por parte de diferentes países, dado el creciente potencial que suscita la Teledetección en la actualidad en diversos ámbitos tales como monitorización ambiental, protección civil o planificación del territorio, cada vez son más las inversiones privadas llevadas a cabo para la puesta en órbita de satélites comerciales.

En base a lo anteriormente expuesto se han destacado los siguientes Programas de observación satelital, haciendo hincapié en aquellos con aplicaciones para la evaluación de los impactos ambientales.

a) Programa Landsat

El programa Landsat surge a principio de los años 70, como una iniciativa gestionada conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos, con objeto de obtener imágenes de satélite de la superficie terrestre como fuente de información en diversas áreas tales como la deforestación, agricultura, geología, uso del suelo, etc.

Esta serie de datos, obtenidos a lo largo de las 8 misiones que se han sucedido, supone la más larga del a historia. Durante más de cuatro décadas los satélites Landsat han adquirido información espectral de la superficie terrestre, generando una base de datos de imágenes alrededor del mundo de gran interés, debido a la antigüedad del programa, la continuidad en el tiempo, la cobertura mundial ofrecida y el grado de detalle de las imágenes.

Este hecho ha posibilitado que actividades específicas de monitorización ambiental, tales como estudios de deforestación, de flujos volcánicos o la monitorización de la contaminación debida a residuos mineros, se hayan podido beneficiar de la amplia disponibilidad de imágenes para realizar estudios multitemporales.

Actualmente, se encuentran en órbita los satélites ópticos Landsat 7 y Landsat 8 a una altura de 705 km y con un ancho de barrido de 185 km y una capacidad de completar una órbita completa cada 99 minutos, lo cual supone 14 órbitas diarias y un periodo de revista de 16 días. Se trata este último, lanzado en febrero de 2013, de un satélite más completo con respecto a su antecesor, ya que posee sus funciones mejoradas para aplicaciones tales como la monitorización de la calidad de las aguas o monitorización atmosférica.

Así, el satélite Landsat 8 tiene dos tipos de sensores a bordo de su plataforma: el Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

Por un lado, el sensor OLI está formado por 9 bandas espectrales capaces de captar desde el espectro visible hasta el espectro de radiación de bajas ondas, pasando por el infrarrojo. Con resoluciones espaciales comprendidas entre 15-30 m, el satélite Landsat 8 es capaz de proporcionar imágenes de una calidad suficiente para demostrar los diferentes usos que puede tener la tierra desde el espacio.

Por su parte, el sensor TIRS está compuesto por dos bandas espectrales situadas en el infrarrojo térmico, lo cual lo convierte en una herramienta interesante para poder medir la temperatura de la superficie terrestre, con aplicaciones tales como la detección de vertidos industriales a cuencas hidrográficas.

Se prevé la continuidad del Programa con su novena misión a cargo del satélite Landsat 9, cuyo despegue está previsto para el año 2020.

b) Programa SPOT

El Programa SPOT (Space Probatoire d' Observation de la Terre) surge en Francia a finales de los años 79, siendo desarrollado por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales francés), en colaboración con Bélgica y Suecia. Este programa está formado por 7 misiones, comenzando la primera en 1986. Una de las características que distingue esta serie de satélites es su capacidad para variar el ángulo de obtención de las imágenes, lo cual aumenta la flexibilidad de adquisición de las mismas, reduciendo la frecuencia temporal.

Actualmente, se encuentran en órbita los satélites SPOT-6 y SPOT-7, lanzados en 2012 y 2017, respectivamente. Estos satélites cuentan con una resolución espacial de 1,5 m en el pancromático, y de 6 m en el multiespectral.

c) Programa GEO (Grupo de Observación de la Tierra)

A principio de la década de los 2000 nace la iniciativa GEO. Se trata de una asociación intergubernamental que actualmente cuenta con más de 100 gobiernos miembros, más de 100 organizaciones y empresas participantes, conectando a instituciones gubernamentales, académicas y de investigación, proveedores de datos, empresas, ingenieros, científicos y expertos para crear soluciones innovadoras a los desafíos globales tales como el cambio climático.

Por tanto, este Programa promueve un intercambio de datos abierto y coordinado, así como herramientas de investigación, formulación de políticas, decisiones y acciones en diversos ámbitos. Los objetivos principales del programa se encuentran dentro del marco de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, el Acuerdo de París y el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres.

Para cumplir con dichos objetivos, la Comunidad GEO ha creado el Sistema Global de Sistemas de Observación de la Tierra (GEOSS) con objeto de conseguir una mayor integración de los sistemas de observación y compartir datos utilizando estándares comunes [80].

El Programa de trabajo GEO es el instrumento principal para planificar e implementar las actividades desarrolladas, entre las que se incluyen iniciativas regionales de observación satelital con diversos propósitos. Entre ellos destacan iniciativas de observación forestal, monitorización de la agricultura, observación de la biodiversidad, u observación del impacto del cambio climático sobre diversos ecosistemas.

Dentro de las iniciativas regionales, destaca el programa europeo, conocido como EuroGEOSS, con el Programa Copérnico como principal exponente.

d) Programa Copérnico

Esta iniciativa de observación satelital está liderada por la Comisión Europea (CE), en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), siendo esta última la responsable de coordinar la distribución de datos recogidos por más de 30 satélites, mientras que la Unión Europea, mediante la Comisión de Medio Ambiente, se encarga de la información recopilada por los sensores espaciales o aerotransportados.

La iniciativa de este proyecto surge para mejorar la gestión del medio ambiente, mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad civil, siendo los datos obtenidos determinantes en la toma de decisiones para decidir las políticas medioambientales de la UE. Por su parte, se pretende lograr una completa, continua y autónoma capacidad de observación de la superficie terrestre facilitando los datos a la comunidad científica, compañías o cualquier persona interesada.

Para lograr dichos objetivos el Programa Copérnico cuenta con seis tipos de satélites, denominados Sentinel, formando parte de distintas misiones para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica. A continuación, se resumen dichos satélites [81] [82]

- Sentinel 1: este satélite, lanzado en 2014, tiene a bordo un sensor radar capaz de proveer imágenes de la superficie terrestre de una alta calidad, resolución espacial y ofreciendo una cobertura mundial. Todo ello con una tecnología que permite la observación cuando las nubes o la oscuridad cubren la superficie de estudio. Entre las aplicaciones con las que cuenta se encuentran las de monitorización marina, control de la superficie terrestre o coordinación de equipos de emergencia.

- Sentinel 2: esta misión es conformada por dos satélites ópticos de alta resolución: el Sentinel-2A (lanzado en junio de 2015), y el Sentinel-2B (lanzado en marzo de 2017) siendo el objetivo principal fijado para la misión el servicio de gestión de emergencias y la integridad territorial.

Ambos satélites se componen por 13 bandas espectrales, con un tiempo de revista de 10 días cada uno, lo cual permite que la combinación de ambos aumente la resolución temporal a 5 días.

- Sentinel 3: esta misión, compuesta por el satélite Sentinel 3A, el cual fue lanzado en 2016, tiene por objeto principal el de monitorizar la superficie de los océanos, medir la temperatura superficial terrestre y oceánica además de obtener imágenes de la coloración del mar y la tierra con una elevada precisión. Esta misión ha supuesto una continuación mejorada de otras misiones anteriores como la SPOT y ENVISAT.
- Sentinel 4 y Sentinel 5 (en Proyecto): Estos satélites, cuyo lanzamiento está previsto para el año 2022, tendrán como objetivo proporcionar datos sobre la monitorización de la composición atmosférica. Por tanto, se trata de sensores transportados en satélites geoestacionarios de tercera generación de Meteosat [83].

e) Satélites comerciales

Se trata de una generación de satélites financiados por organismos privados, con objeto de dar un impulso a la comercialización de imágenes de satélite de muy alta resolución, introduciendo así las técnicas de Teledetección ambiental en mercados que durante años han sido ocupados por la fotografía aérea [74].

La gran mayoría de avances tecnológicos en este sector está siendo impulsada, en su mayoría, por compañías estadounidenses especializadas en comercializar las imágenes captadas por diferentes satélites con elevadas resoluciones espaciales. A continuación, se muestran algunos de los satélites comerciales más importantes hasta la fecha.

- **IKONOS**: este satélite, puesto en órbita en 1999 por la compañía Geoeeye (posteriormente adquirida por DigitalGlobe), fue el primer satélite comercial en proporcionar imágenes de satélite de muy alta resolución espacial (de 0,8 m en canal pancromático y 3,2 m en multiespectral), lo cual supuso un hito importante en la historia de la observación terrestre desde el espacio. Las imágenes satelitales han sido usadas por gobiernos regionales y locales para la seguridad nacional, planificación militar, transporte aéreo o marítimo. Finalmente, fue retirado en el año 2015.
- **Quickbird**: este satélite de muy alta resolución, operado por la compañía norteamericana DigitalGlobe, inició su actividad en el año 2001. Su lanzamiento supuso un enorme auge para dicha compañía, la cual vio multiplicados sus clientes debido a que ofrecía la mayor resolución espacial hasta la fecha. Entre sus aplicaciones principales se encontraban la cartografía, urbanismo e investigación. Finalmente, fue sacado de su órbita a finales del año 2014.
- **Geoeeye-1**: este satélite, lanzado originariamente por la compañía Geoeeye (actualmente perteneciente a DigitalGlobe) en el año 2008, es capaz de capturar imágenes con una resolución espacial de 0,41 m en el pancromático, y 1,65 m para una resolución multiespectral. Entre las aplicaciones más comunes destacan proyectos de planeamiento del terreno a gran escala, con un tiempo de revista igual o inferior a 3 días. Por su parte, entre los principales clientes e inversores de este satélite se encuentran la Agencia Geoespacial de Inteligencia Nacional (NGA), y Google, con acceso directo a las imágenes con las que actualiza su visor cartográfico Google-Earth.

- **Worldview:** se trata de una constelación de satélites ópticos de alta resolución pertenecientes a la Compañía estadounidense DigitalGlobe. El primero de ellos, el Worldview-1, despegó en septiembre de 2007, proporcionando una banda pancromática con una resolución espacial de 0,5 m. Le siguió el Worldview-2, en el año 2009, el cual fue el primer satélite comercial con 8 bandas multiespectrales de alta resolución, convirtiéndose en una herramienta de gran valor durante años para la captación de imágenes de satélite. Posteriormente, con el lanzamiento del Worldview-3 en 2014, se inició una nueva era de satélites comerciales, con 29 sensores espectrales en órbita, el Worldview-3 fue el primer satélite con una resolución espacial de 0,31 m. Este satélite se complementa con el Worldview-4, puesto en el año 2016, y de iguales especificaciones técnicas que el anterior, lo cual hace que aumenten la resolución temporal al doble. De este modo, dado sus elevadas resoluciones, están dedicados principalmente a aplicaciones militares y de defensa civil. No obstante, en casos en los que el coste de adquisición no representa un problema, son muy adecuados para aplicaciones mineras, petroleras, clasificación del terreno, monitorización de especies vegetales, seguimiento de desastres naturales, etc.
- **Pleiades:** se trata de una constelación de dos satélites ópticos de alta resolución fruto de la colaboración franco-italiana ORFEO (Optical & Radar Federated Earth Observation), con el CNES como contratista principal y la compañía Airbus Defense and Space como principal distribuidora de los productos. Este programa complementa la oferta de imágenes de los satélites SPOT, siendo distribuida dicha información por Spot Image. La constelación está formada por los satélites Pleiades-1A y el Pleiades-1B, los cuales fueron lanzados en 2011 y 2012, respectivamente. Ambos satélites se encuentran en la misma órbita y disponen de los mismos sensores, consiguiendo una resolución temporal de 1 día. En cuanto a especificaciones técnicas, ofrecen una resolución espacial de 0,5 m en la banda pancromática y 2 metros en las multiespectrales, mientras que disponen de un ancho de barrido de 20 km. Por su parte, la principal característica que diferencia a estos satélites es su capacidad de adquisición de imágenes estereoscópicas para capturar y representar elementos en 3D, permitiendo la generación de modelos digitales de elevación (DEM). Por tanto, son de especial interés en aplicaciones de planificación del territorio.

A continuación, se ha hecho una recopilación de los principales satélites actualmente en órbita, con aplicaciones en el ámbito de la vigilancia y control de la calidad de las aguas superficiales, sobre la cual versa el presente Proyecto. En dicha clasificación se distinguen aspectos tales como los siguientes:

- Nombre del satélite.
- Programa en el que se encuadra, o Compañía a la que pertenece.
- Fecha y lugar de lanzamiento del satélite.
- Número de bandas espectrales que ofrece y longitudes de onda en las que se mueven dichas bandas.
- Resolución espacial que proporciona cada banda espectral que ofrece el sensor.
- El ancho de barrido se refiere al ancho de la franja de la superficie terrestre que es capaz de captar el instrumento de observación.
- El tiempo de revista se refiere a la resolución temporal del sensor. Este dato es orientativo en tanto en cuanto, varía en función de la latitud y del ángulo con el que se adquiera la imagen.
- El precio de adquisición refleja el precio mínimo por kilómetro cuadrado de una imagen adquirida por encargo, para una fecha determinada. Se trata de un dato orientativo, para dar una idea comparativa de cuánto costaría adquirir una imagen en una determinada zona. Este precio, por tanto, está sujeto a una serie de factores (tamaño del pedido, prioridad, porcentaje mínimo de nubes, grado de procesamiento e imagen, fecha de adquisición, empresa suministradora, etc.).

Tabla 3–1. Comparativa de satélites para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (Fuente: Elaboración propia [40])

Satélite	Programa/Compañía	País	Fecha de lanzamiento	Estado	Bandas espectrales (nm)	Resolución espacial (m)	Ancho de barrido (km)	Tiempo de revista (días)	Precio adquisición ²³ (\$/€)/km ²
World View-4	DigitalGlobe	EEUU	11/11/2016	Activo	4 (655-920) - 1 Pan (450-800)	1,24-0,31	13,2	1-4,5	35,50-29
World View-3	DigitalGlobe	EEUU	13/08/2014	Activo	8 (400-1040) - 1 Pan (450-800) - 8 SWIR (1195-2365)	1,24-0,31-3,7	13,1	1-4,5	34
World View-2	DigitalGlobe	EEUU	08/10/2009	Activo	8 (400–1040) -1 Pan (450–800)	1,85-0,46	16,4	1,1	29-26
World View-1	DigitalGlobe	EEUU	18/09/2007	Activo	Pan	0,5	17,7	1,7	29-26
IKONOS	DigitalGlobe	EEUU	24/09/1999	Inactivo	4 (445-853) – 1 Pan (526-929)	3,2-0,82	11,3	3	10
Quickbird	DigitalGlobe	EEUU	18/10/2001	Inactivo	4 (430-918) – 1 Pan (450-900)	2,62	18	2,5	17,50
Geoeye-1	DigitalGlobe	EEUU	06/09/2010	Activo	4 (450–920) -1 Pan (450–800)	1,65-0,41	15,2	<3	29-26
Pleiades-1A	CNES (Airbus Defense & Space)	Francia	16/12/2011	Activo	4 (430-950) - 1 Pan (450-800)	2-0,5	20	1	21,25
KOMPSAT-3	KARI (Mitsubishi Heavy Industries)	Corea del Sur	17/05/2012	Activo	4 (450-900) - 1 Pan (450-900)	2,8-0,7	15	--	16
KOMPSAT-3A	KARI (Mitsubishi Heavy Industries)	Corea del Sur	25/03/2015	Activo	4 (450-900) - 1 Pan (450-900) - 1 MWIR (3300-5200)	2,2-0,55-5,5	12	--	18

²³ Se han tomado los datos de la lista de precios, para una prioridad estándar de adquisición, recogidos en el Catálogo de precios suministrado por la Compañía *Apollo Mapping* (agosto 2019).

Tabla 3–2. Comparativa de satélites para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (CONT.)

Satélite	Programa/Compañía	País	Fecha de lanzamiento	Estado	Bandas espectrales (nm)	Resolución espacial (m)	Ancho de barrido (km)	Tiempo de revista (días)	Precio adquisición ²⁴ (\$/€)/km ²
Super View-1	Beijing Space View	China	09/01/2018	Activo	4 (450-890) - 1 Pan (450-890)	2-0,5	12	2	23
Sky Sat-1	Planet Lab	USA	21/11/2013	Activo	4 (450-900) - 1 Pan (450-900)	1-0,8	8	--	9
Jilin- Hyperspectral	Chang Guang Satellite Company	Japan	21/01/2019	Activo	28 (Hyperspectral)	5	--	--	44
SPOT-6/7	CNES	Francia	2012/2014	Activo	4 (450-890) - 2 Pan (450-745) -	6-1,5	60	1	1,65
Landsat 8-OLI/TIRS	NASA	EEUU	11/02/2013	Activo	5 (430–880)-1 Pan (500–680) - 2 SWIR (1570–2290) - 1 CIRRUS (1360–1380) - 2 TIRS (10,600–12,510)	30-15-100	170	16	--
Landsat-7 ETM+	NASA	EEUU	05/04/1999	Inactivo	6 (450-880)-1 Pan (520-900)-1 (2090-2350)-1(1040-1250)	30-15-60	183	16	--
Landsat-5 TM	NASA	EEUU	01/03/1984	Inactivo	4 (450-1750)-1 (2080-2350)-1 (1040-1250)	30-120	185	16	--
Landsat-5 MSS	NASA	EEUU	01/03/1984	Inactivo	4 (450-1750)-1 Pan (1040-1250)	30-120	185	16	--
EO-1 Hyperion	NASA	EEUU	21/11/2000	Inactivo	242 (350-2570)	30	7,5	16	
EO-1 ALI	NASA	EEUU	21/11/2000	Inactivo	9 (433-2350) – 1 Pan (480-690)	10-30	185	16	
Terra ASTER	NASA	EEUU	18/12/1999	Inactivo	3 VNIR (520-860)-6 SWIR (1600-2430)- 5 TIR (8125-11650)	15-30-90	60	16	

²⁴ Se han tomado los datos de la lista de precios, para una prioridad estándar de adquisición, recogidos en el Catálogo de precios suministrado por la Compañía *Apollo Mapping* (agosto 2019).

3.6.2 Sensores aerotransportados

Las imágenes hiperespectrales captadas por sensores aerotransportados proporcionan datos de alta resolución espacial y espectral que pueden utilizarse para detectar una amplia gama de especies en base a la respuesta espectral que posee cada una. Este método de Teledetección lleva a cabo un muestreo contiguo y detallado de las medidas de radiación solar reflejada en las regiones visible e infrarroja del espectro. Posteriormente, se lleva a cabo una corrección radiométrica y geométrica de las medidas en función de la reflectancia aparente de la superficie. A raíz de los datos de reflectancia se pueden identificar los elementos, o la mezcla de ellos, que predomina en cada píxel [40] [84].

Las aeronaves sobre las cuales se sitúan los sensores suelen sobrevolar la zona de estudio a una altura comprendida entre 1.000 y 5.000 metros sobre la elevación promedio del suelo, con una resolución de píxeles variable. No obstante, la altitud es fija para cada línea de vuelo [84]. Por su parte, los principales factores limitantes son las condiciones climáticas y la exposición de los elementos. Así, el vuelo debe producirse en condiciones de cielo despejado, así como una exposición adecuada de los elementos susceptibles de ser identificados para un determinado estudio concreto [40] [84].

En cuanto a los instrumentos utilizados, señalar que estos pueden ser espectrómetros de barrido o de empuje. Los espectrómetros de barrido, son aquellos que disponen de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados de la misma. En cada movimiento del espejo se envía la información determinada a los sensores. Por otro lado, los espectrómetros de empuje disponen, en lugar del espejo móvil, de una cadena de detectores que cubren todo el campo visual del sensor, con lo cual se aumenta la resolución espacial y se reducen los errores geométricos ocasionados por la parte móvil de los detectores de barrido. No obstante, la calibración de los sensores para adquirir un comportamiento homogéneo resulta compleja.

Con respecto a la aplicación de los mismos, indicar que son ampliamente utilizados en el ámbito forestal, agrícola, oceanográfico, y por las comunidades científicas [40] [84]. No obstante, alguno de los condicionantes que han contribuido a la lentitud de su desarrollo han sido el relativo alto coste de los estudios, mínima competencia entre los operadores, falta de métodos de inversión robustos o el conocimiento limitado de la tecnología por parte de los usuarios.

Se trata de una tecnología relativamente nueva, la cual se viene llevando a cabo desde los años 80 con fines científicos principalmente. No será hasta los años 90 cuando se desarrolle con fines más comerciales [84].

En la década de los 80, la compañía de investigación ambiental geofísica (GER) desarrolló un sensor aerotransportado (GERIS) que disponía de 63 canales capaces de medir una línea del espectro electromagnético, puesto en operación a mitad de los años 80.

En esta misma época, un grupo de científicos de la NASA desarrolla el espectrómetro de imagen aerotransportado (AVIRIS), cuyo vuelo inicial tuvo lugar en 1987, sufriendo con el paso del tiempo continuas mejoras en cuanto a señal de ruido y flexibilidad operacional. De este modo, este sensor dispone de 224 canales de datos en continuo trabajando en el VNIR, con una buena capacidad de absorción atmosférica lo cual facilita la corrección de los datos adquiridos con interferencias atmosféricas. El tamaño de píxel varía entre los 15 metros y los 3-5 metros, dependiendo de la altitud de la misión. Cabe destacar que este instrumento se ha venido utilizando principalmente con fines científicos.

A finales de los 80 surgen los primeros sistemas comerciales, tales como el sensor CASI operado por la compañía ITRES, cubriendo únicamente el rango visible e infrarrojo cercano; así como el sensor SFSI que

también cubría las regiones SWIR y TIR, siendo desarrollado por del Centro de Teledetección de Canadá (CCRS).

Posteriormente, en los años 90 se diseña un espectrómetro con fines de exploración, por parte de la empresa Science Inc. Hyperspectral. Se trata del sensor HyMap, convirtiéndose en el sensor estándar utilizado a finales de los 90 y principios de los años 2000.

En 2002, la Compañía Spectir desarrolla el sensor hiperespectral HST, con una elevada resolución espacial (inferior a 1 metro) lo cual reduce la problemática de la multiplicidad de elementos acumulados en un píxel.

Finalmente, entre otros sensores destacados de alta resolución se encuentran las cámaras hiperespectrales AISA, con resolución inferior a 5nm, así como el sensor HySpex.

Por su parte, el coste de adquisición y procesado de datos captados por sensores a bordo de VAT varía en función del vehículo e instrumento utilizados, así como localización y geometría de la zona de estudio, teniendo un menor impacto el tipo de plataforma, en tanto en cuanto, un vehículo de mayor coste supone una mayor rapidez y eficiencia [84].

Entre los costes de operación se incluyen el coste del sensor (precio por día), vehículo y combustible (coste por hora, incluido el piloto), costes de tripulación, que pueden ser 1-2 operadores y un piloto adicional (precio por día) y costes adicionales (costes por día y persona) [84].

Los costes de adquisición incluyen las correcciones geométricas y radiométricas, así como la entrega de datos, de tal modo que los costes de inversión de datos procesados variarán en función del nivel de detalle deseado por el cliente [84].

A continuación, se ha hecho una recopilación de los principales sensores vehiculados, con aplicaciones en el ámbito de la vigilancia y control de la calidad de las aguas superficiales, sobre la cual versa el presente Proyecto. En dicha clasificación se distinguen los siguientes aspectos distintivos:

- Denominación del sensor
- Compañía fabricante
- Tipología de sensor
- Número de bandas que posee
- Rango espectral de las bandas
- Tamaño de píxel
- Ancho de barrido de la imagen

Tabla 3–3. Comparativa de sensores a bordo de VAT para la monitorización y vigilancia de la calidad de las aguas (Fuente: Elaboración propia [40])

Sensor	Nombre	Compañía	Tipo	Número de bandas	Rango espectral (nm)	Resolución (m)	Ancho de barrido
AVIRIS	Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer	NASA	Hiperespectral	224	0,40-2,50	17	12 km
HYDICE	Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment	Naval Research Lab.	Hiperespectral	210	0,40-2,50	0,8-4	270 m
HyMap	in the U.S. known as PROBE-1 Earth Search	Sciences Inc. Hyperspectral	Hiperespectral	128	0,40-2,50	3-10	512 píxeles
APEX	Airborne Prism Experiment	VITO	Hiperespectral	300 VIS/NIR (114), SWIR (199)	VIS/NIR (0,38-0,97), SWIR (0,97-2,50)	2-5	2,5-5 KM
CASI-1500	Compact Airborne Spectrographic Imager	ITRES Research Limited	Hiperespectral	228	0,40-1,0	0,5-3	512 píxeles
EPS-H	Environmental Protection System	Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer	Hiperespectral	VIS/NIR (76), SWIR (32), TIR (12)	VIS/NIR (0.43–1.05), SWIR1 (1.50–1.80), SWIR2 (2.00–2.50), TIR (8–12.50)	1,0	89 °
AISA	Airborne Imaging Spectrometer	Spectral Imaging	Hiperespectral	288	0,43-0,90	1,0	512 píxeles
MIVIS	Daedalus Multispectral Scanner (MSS)	Daedalus Enterprise Inc., USA	Multiespectral	102 VIS/NIR (28), MIR (64), TIR (10)	VIS (0.43–0.83), NIR (1.15–1.55), MIR (2.0–2.5), TIR (8.2–12.7)	3-8	5,6 km (4000 m altitud)
HySpex ODIN-1024	HySpex hyperspectral cameras	Norsk Elektro Optikk (NEO)	Hiperespectral	VIS/NIR1 (128), VIS/NIR2 (160), SWIR1 (160), SWIR2 (256)	0.40–2.50	0,5 (2000 m de altitud)	500 m

4 LIMITACIONES Y CONDICIONANTES EN EL EMPLEO DE LA OST

Tras hacer un repaso acerca de los fundamentos básicos en los que se basan las técnicas de observación satelital, las diferentes clasificaciones de los sistemas de Teledetección, y llevar a cabo una selección de los diferentes sensores con aplicaciones para la monitorización de la calidad de las aguas, en este apartado se pretende poner de manifiesto cuales son las principales limitaciones que conlleva el uso de esta tecnología emergente, así como los condicionantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar un tipo de sensor u otro, mediante una comparativa entre los principales parámetros que los caracterizan.

Finalmente, teniendo en cuenta limitaciones, condicionantes, así como ventajas del uso de estas técnicas emergentes, se propondrá un posible modelo a seguir para la determinación de la calidad de las aguas.

4.1 Consideraciones para la selección de un determinado sensor

Los sensores espaciales y aerotransportados anteriormente revisados poseen una serie de ventajas e inconvenientes, en función de sus características específicas, para su uso como herramienta en la monitorización de la calidad de las aguas. Así, se han de tener en cuenta diferentes consideraciones a la hora de seleccionar un sensor adecuado para realizar un proyecto concreto, entre las que se encuentran la superficie de área de estudio, la resolución espacial y espectral necesaria para llevar a detectar los diferentes elementos de estudio, o bien el periodo de tiempo previsto para dicho análisis.

A continuación, se establece una comparativa resumida entre los dos tipos de aplicaciones de Teledetección en cuanto a una serie de parámetros básicos. Con ello se pretende dar una idea general del potencial que presenta cada una, de las principales diferencias que existen entre ellas, así como de aquellos parámetros a tener en cuenta a la hora de seleccionar el sensor adecuado para cualquier operación.

En cuanto a la selección del **tiempo de paso** de un sensor por una determinada zona, los satélites suelen presentar un periodo fijo de paso, mientras que los sensores aerotransportados presentan mayor flexibilidad, en tanto en cuanto, las campañas en las que se realizan los vuelos se encuentran predefinidas.

Referente a la **resolución espacial**, señalar que para satélites suele oscilar entre unos pocos metros (baja altitud del sensor) hasta kilómetros (altitud considerable del sensor). En el caso de sensores aerotransportados suele ser inferior a 5 m.

Con respecto a la **resolución espectral**, la mayoría de satélites pancromáticos suele ser multiespectral, aunque se están desarrollando sensores hiperespectrales; en el caso de los aerotransportados suelen ser hiperespectrales.

La **resolución temporal** es de días, para sensores satelitales, y de minutos para aerotransportados.

La **calibración** debe ser realizada previo lanzamiento, con un posterior seguimiento para satélites; mientras que para sensores aerotransportados debe realizarse antes y durante el vuelo.

En cuanto al **coste** total de adquisición y procesado de las imágenes, suelen ser más costosas las adquiridas a partir de sensores aerotransportados debido a, como se ha podido comprobar anteriormente, la cantidad de costes asociados que supone.

El **ancho de barrido** de la imagen es elevado para las adquiridas mediante satélite y pequeño para las captadas por aerotransportados.

La **interpretación de datos** suele realizarse a través de métodos empíricos y semi empíricos (satélites) y empíricos y analíticos (sensores aerotransportados).

El **procesamiento de imágenes** suele ser de mayor complejidad para las adquiridas mediante sensores aerotransportados. Ello es debido a que se trata de imágenes hiperespectrales que requieren de habilidades específicas.

Las **restricciones** que limitan la programación de la cobertura del satélite están motivadas principalmente por las condiciones climatológicas y cobertura de nube, lo cual puede ocasionar problemas en el seguimiento normal de la calidad de las aguas en determinadas épocas del año. En cambio, la programación es más flexible en el caso de sensores aerotransportados.

En cuanto a la capacidad de áreas geográficas que abarca el sensor, señalar que la Teledetección mediante satelitales puede realizarse a nivel local, regional y global, mientras que la de sensores aerotransportados se restringen a escala regional y local.

4.2 Limitaciones en el empleo de técnicas de Teledetección para la monitorización y control de la calidad de las aguas

Las técnicas de Teledetección son una herramienta adecuada para el estudio de las variaciones espaciales y temporales de los diferentes parámetros indicadores de la calidad de las aguas. No obstante lo anterior, se requiere tener en cuenta una serie de consideraciones para su aplicación debido a las restricciones que conlleva el empleo de dichas técnicas. En este sentido, los modelos desarrollados a partir de los datos obtenidos requieren llevar a cabo una correcta calibración y validación utilizando medidas in-situ, todo ello en ausencia de cobertura de nube. Además, se han de tener en cuenta las desviaciones en la extracción de datos debidas a correcciones atmosféricas y errores en el procesamiento de las imágenes.

Las limitaciones en lo que respecta a resolución espacial, espectral y temporal de los distintos sensores actualmente utilizados pueden ser determinantes a la hora de seleccionar el más adecuado para una determinada actuación. En determinadas ocasiones algunos parámetros clave para la caracterización de las masas de agua no son fácilmente medibles de manera directa mediante determinados sensores.

Por su parte, el coste que conlleva la adquisición de datos mediante sensores hiperespectrales aerotransportados, así como la adquisición de equipos hiperespectrales para llevar a cabo las medidas en campo, suponen una de las mayores restricciones a la hora de usar aplicaciones de Teledetección ambiental para estimar la calidad de las aguas.

A todo lo anterior hay que sumar las consideraciones que se citan a continuación.

- La existencia de ciertas complejidades inherentes a las aguas continentales y costeras que dificultan la detección de determinados parámetros de calidad, lo cual estrecha considerablemente el alcance de las aplicaciones de Teledetección en este ámbito.
- La falta de bibliografía contrastada para la obtención de las firmas espectrales de determinados parámetros indicadores, lo cual complica la determinación de la calidad de las aguas.
- A pesar de la existencia de una gran cantidad de estudios centrados en las variables ópticas de determinados parámetros, aún no se ha profundizado en otros parámetros fundamentales para la estimación de la calidad de las aguas, debido a que presentan características ópticas débiles, así como una baja relación de la señal de ruido.
- Las interferencias atmosféricas generan restricciones en las señales ópticas procedentes de las masas de agua. Asimismo, una elevada concentración de sólidos en suspensión impide la penetración de la luz, ocasionando una disminución de la capa de agua superficial detectable por los sensores.

4.3 Metodología propuesta para la monitorización de la calidad de las aguas

Una vez planteados los principales factores limitantes a los que se enfrentan actualmente las técnicas de Teledetección, se propone el uso combinado de las técnicas de observación satelital y los Sistema de Información Geográfica (SIG) junto con los métodos tradicionales de muestreo en campo. De esta forma, se consigue desarrollar una herramienta de mayor efectividad y precisión, y menor coste para la monitorización de los parámetros de calidad de las masas de agua (ríos, lagos, aguas subterráneas, estuarios, etc.).

Por un lado, las imágenes satelitales hiperspectrales, las cuales disponen de alrededor de 200 canales espectrales, son sistemas de gran interés para la detección de los parámetros de calidad de las aguas y se caracterizan por su flexibilidad debido a su alta resolución espacial y espectral, siendo adecuadas para la observación de masas de agua de gran extensión. Análogamente, los sensores hiperspectrales aerotransportados poseen un elevado potencial debido a que son capaces de captar datos simultáneamente mediante bandas continuas y estrechas permitiendo medir y monitorizar los parámetros de calidad de las aguas de manera continua. Este tipo de sensores resultan más adecuados cuando se requiere estudiar con detalle pequeñas masas de agua tales como un río y sus afluentes, estuarios

Por otro, las técnicas de monitorización de la calidad de las aguas actualmente utilizadas se basan en modelos de monitorización periódica y continua.

Adicionalmente a lo anterior, el desarrollo de software especializado en el análisis de la gran cantidad de datos adquiridos, así como el uso de sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas importantes para el almacenamiento, manipulación y análisis de los datos. De esta forma, el uso de los SIG como complemento de las técnicas de observación satelital supone una mejora sustancial de los nuevos programas de monitorización, lo cual es fundamental para lograr una gestión y desarrollo sostenible de los recursos hídricos.

A pesar de los esfuerzos llevados a cabo por la comunidad científica para el estudio y mejora de las técnicas de Teledetección, aún no ha sido implementada una rutina, dentro del marco de evaluación de la calidad de las aguas, para llevar a cabo esta tarea por medio de técnicas de observación satelital. En este sentido, se propone a continuación un posible procedimiento para la vigilancia y control ambiental de la calidad de las aguas aunando las técnicas de Teledetección emergentes a los métodos de campo convencionales.

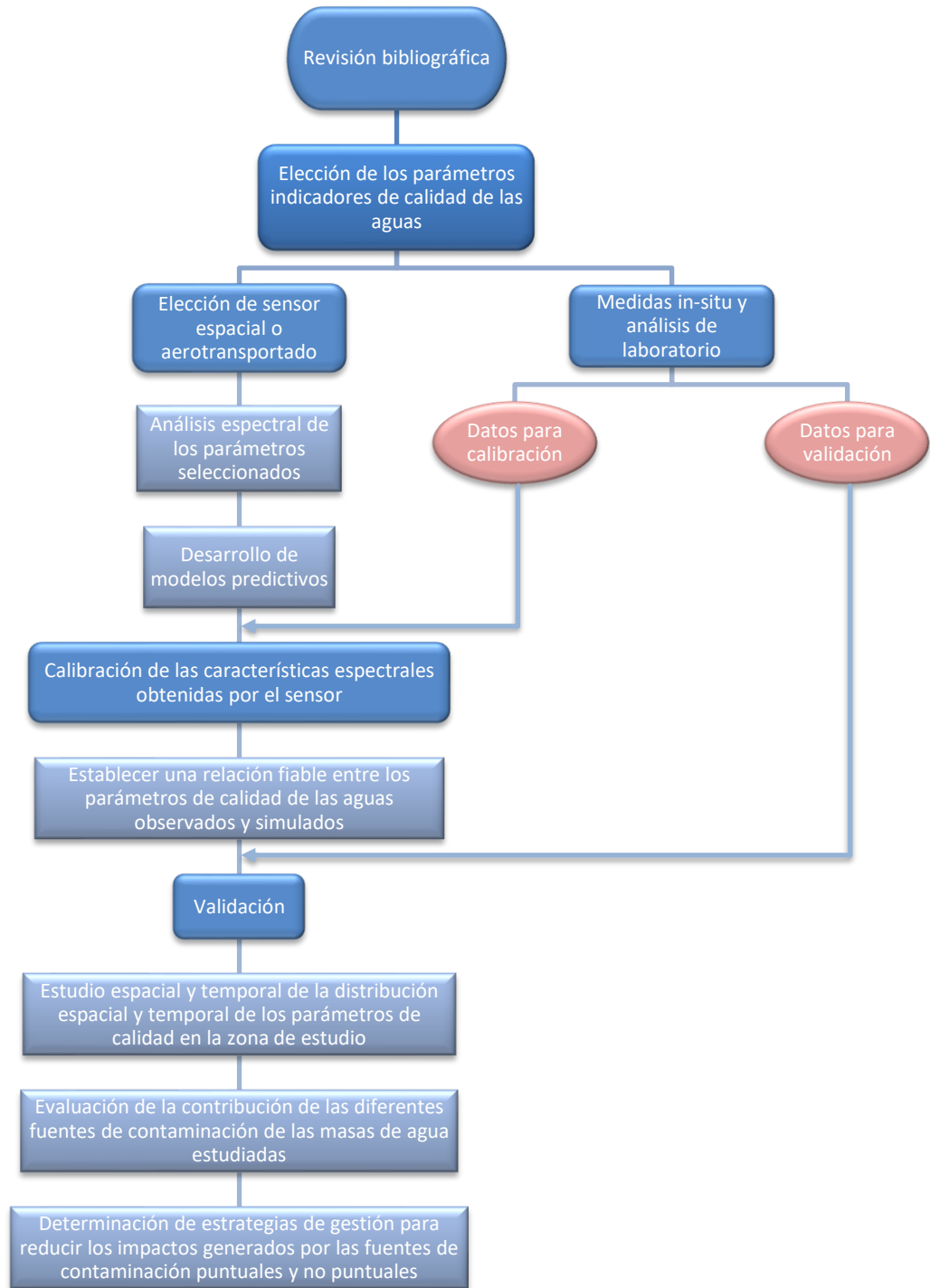


Figura 4-1. Procedimiento propuesto para predecir y estimar las variables de calidad de las aguas mediante una combinación entre técnicas de observación satelital y métodos convencionales (Fuente: elaboración propia [40])

Tal y como puede observarse en el diagrama de bloques propuesto, se parte de una revisión bibliográfica en la cual se obtengan toda la información posible sobre la zona de estudio seleccionada. A partir de dichos datos, se ha de elegir los parámetros (físicos, químicos y biológicos) de interés para llevar a cabo la caracterización de las masas de agua a estudiar. Dichos parámetros serán fundamentalmente los característicos de las actividades llevadas a cabo en el entorno del área de estudio.

Posteriormente, teniendo en cuenta la finalidad del Proyecto, se seleccionará el sensor más adecuado para llevar a cabo el estudio (en base a las consideraciones expuestas en epígrafes anteriores). Análogamente, se han de llevar a cabo medidas de campo, así como análisis de laboratorio de las muestras tomadas.

Una vez seleccionado el sensor, y captadas las imágenes por parte de este, se llevará a cabo un análisis espectral de las especies seleccionadas previamente como indicadores de calidad para elaborar modelos predictivos sobre la evolución de los mismos. Asimismo, se utilizará parte de las muestras analizadas en campo para la calibración del sensor, obteniéndose con ello una relación entre los parámetros observados, así como los analizados.

La otra parte de los análisis de campo servirá para la validación de los resultados obtenidos a partir de las imágenes captadas por el sensor, previamente calibrado.

Una vez llevada a cabo la validación de datos, se procede a la interpretación de los mismos. Ello posibilita la realización de estudios multitemporales en los cuales se analice la distribución espacial de los parámetros analizados en la zona de estudio determinada. Con ello, se puede identificar y evaluar la contribución de las fuentes de contaminación (puntuales y no puntuales) de las masas de agua estudiadas.

Finalmente, a partir de la interpretación de los resultados obtenidos se pueden definir estrategias de gestión y mitigación de los impactos generados por las fuentes de contaminación sobre la zona de estudio.

5 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

Una vez expuestos los fundamentos básicos de Teledetección, realizada la comparativa entre los diferentes sensores existentes en la actualidad y analizados los factores limitantes a la hora de seleccionar un determinado sistema para determinar la calidad de las aguas continentales, en este Capítulo se lleva a cabo, a partir de una revisión bibliográfica, una selección de estudios de aplicación de diferentes aplicaciones de Teledetección para controlar la calidad de las aguas contaminadas por AMD en diferentes zonas del mundo. Con ello se pretende, por un lado, dejar constancia de la magnitud de este problema y, como consecuencia, las propuestas de actuación que se están desarrollando para abordar dicha problemática.

5.1 Monitorización del potencial del Drenaje Ácido de Mina sobre la cuenca del río Odiel, Huelva

La cuenca del río Odiel (Huelva) atraviesa la Faja Pirítica Ibérica (FPI), considerada como el depósito masivo de minerales sulfuros más grande del mundo, explotados desde hace alrededor de 5000 años. Esta unidad geológica se extiende por más de 250 km, desde Sevilla hasta el suroeste de la costa de Portugal [85]. Por su parte, la pirita es el mineral de mayor abundancia tanto en los residuos mineros como en las formaciones rocosas, lo cual provoca que el río reciba aguas contaminadas procedentes de las numerosas explotaciones mineras que hay a lo largo de su curso, con altas concentraciones de sulfatos y metales pesados procedentes de los procesos de drenaje ácido (AMD). De este modo, el proceso de AMD deriva de la oxidación de los minerales sulfuros en tras la meteorización de las rocas, al quedar expuestas a la atmósfera, y en contacto con el agua [86].

En este sentido, durante las últimas décadas son numerosos los estudios que se están realizando para estimar el potencial contaminante del Drenaje ácido de mina sobre la cuenca del río utilizando técnicas de Teledetección, mediante observación satelital o a través de imágenes captadas por sensores aerotransportados.

Las técnicas de Teledetección tradicionales han usado las propiedades ópticas del agua, relacionando el color del mismo con parámetros como la profundidad del agua, la concentración de partículas en suspensión, o la presencia de pigmentos de vegetación (como la clorofila) cercanos a la superficie, tanto en aguas continentales como oceánicas.

Por su parte, las aguas continentales, oceánicas y estuarinas han sido objeto de numerosos estudios utilizando sensores hiperespectrales para estimar parámetros fisicoquímicos tales como la concentración de partículas orgánicas disueltas, clorofila o partículas en suspensión.

En cuanto a estudios concretos de monitorización de aguas ácidas contaminadas como consecuencia de residuos mineros, se ha hecho una selección de una serie de casos de estudio empleando diferentes indicadores para monitorizar la calidad de las aguas superficiales contaminadas por AMD.

Previamente a la presentación de los casos prácticos seleccionados, se llevará a cabo una puesta en situación de la zona objeto del seguimiento.

5.1.1 Descripción de la zona de estudio

El área escogida para los estudios llevados a cabo es la zona del complejo minero Sotiel-Migollas, situado en los términos de Sotiel de Coronada y Calañas (Huelva), debido principalmente a que se sitúa a mitad del transcurso del río, lo cual hacía que los trabajos de extracción y procesado se desarrollasen en las proximidades de la propia cuenca. El río fue utilizado como sistema de lavado, para lo cual fueron construidos varios muros a lo largo de la zona, donde se formaron vertederos. Como consecuencia, el caudal del río disminuyó artificialmente lo cual propició la formación de piscinas de agua estancada [85] [86] [87].

El complejo minero, incluye la planta de procesado, balsas de estériles y de lixiviados. En el caso de la mina Sotiel, comenzaron a acumularse depósitos desde el año 1984, producto de la extracción de cobre, plomo y cinc principalmente. Además del tratamiento de sulfuros polimetálicos, se aprovechaba una cantidad de sulfuro para la producción de ácido sulfúrico. Los productos de extracción eran metales ricos en cobre, plomo y cinc, así como ácido sulfúrico y óleum. Por su parte, la explotación del yacimiento de Migollas comenzó en el año 1989 para la extracción de cobre y plata.

Finalmente, el complejo minero Sotiel-Migollas fue abandonado en el año 2002 [85].

La localización de la zona de estudio seleccionada se recoge a continuación en la siguiente Figura.

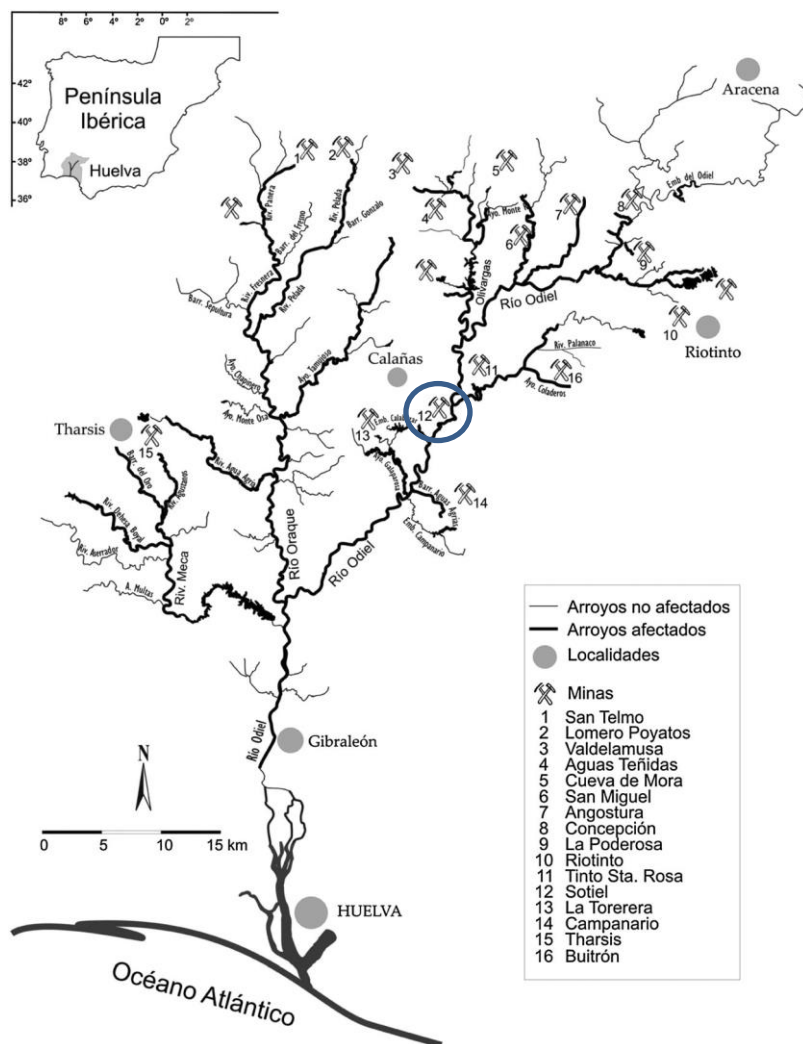


Figura 5-1. Ubicación de la zona de estudio (Complejo minero Sotiel-Migollas) sobre la cuenca del río Odiel (Huelva) [86]

5.1.2 Influencia del clima en la geoquímica del Drenaje Ácido de Mina

El clima es el factor determinante en el patrón geoquímico de la precipitación de los minerales secundarios a lo largo del curso del río.

Huelva es una región con un clima semi-árido, en el que existen dos estaciones anuales húmeda y seca. Se caracteriza por periodos de lluvias cortos e intensos, sobre todo en otoño, inviernos relativamente secos y primavera y verano secos. Así, durante la estación húmeda el nivel del río aumenta considerablemente, arrastrando productos de sulfuros de hierro disueltos. Tras el periodo de lluvias, el nivel del río disminuye, lo cual hace que los sedimentos queden expuestos, comenzando a oxidarse durante las estaciones secas, dando lugar a una secuencia de minerales.

Por consiguiente, se concluye que el sulfato de hierro hidratado contenido en el cauce del río Odiel precipita y se disuelve de forma variable siguiendo un complejo patrón geológico controlado por el clima [85] [86] [87].

Caso de estudio 1: Evolución temporal en los sedimentos del río Odiel haciendo uso de imágenes hiperespectrales

La espectroscopía de imágenes mediante espectrotecas de archivo, para evaluar la evolución de residuos mineros, es una técnica que permite un análisis mineralógico rápido, ahorrando tiempo y costes con respecto al método tradicional de recolección de muestras y interpretación espacial de los resultados mediante análisis químicos o mineralógicos [88]. Asimismo, permite realizar un diagnóstico mineralógico de las costras delgadas que concentran metales pesados en superficies inaccesibles a la observación directa [90]. Por tanto, supone una herramienta de gran interés para la evaluación ambiental.

En ese sentido, al objeto de desarrollar un método de seguimiento eficaz y fiable para la estimación de la calidad de las aguas, del cual puedan hacer uso las administraciones en un futuro, la cartografía de contaminantes generados como consecuencia de la oxidación de residuos mineros con alto contenido en sulfuros de hierro en el cauce de ríos, mediante uso de imágenes hiperespectrales, ha sido objeto de numerosos estudios llevados a cabo por Buzzi, J., Riaza, A., García-Meléndez, E., et al. [86] [87] [89] [90], derivando en tesis doctorales tales como la de Buzzi, J. en 2012 [91].

De este modo, la espectroscopía de imágenes, aplicada a datos tomados por el sensor HyMap durante una serie de años, ha servido como herramienta para establecer una distribución y evolución de los distintos contaminantes de los productos de meteorización de la pirita a lo largo del cauce del río [86].

Así, en este apartado se pretende resumir esta línea de investigación mediante uno de los estudios realizados, el cual consiste en cartografiar la evolución temporal de sustancias producto de la meteorización de piritas en la mina de Sotiel (Huelva), usando datos del sensor aerotransportado HyMap, tomadas en diferentes fechas [86].

Posteriormente, a partir de las cartografías realizadas, se estimó la variabilidad climática utilizando series minerales conocidas por oxidación de piritas y espectrotecas de referencia.

De este modo, la cartografía de dichas sustancias puede servir de registro de la variabilidad climática estacional y anual, pudiendo ser utilizada como herramienta para establecer geoindicadores en zonas semiáridas [86].

a) Adquisición de datos

Para llevar a cabo el estudio se imágenes de la mina Sotiel captadas por el sensor aerotransportado HyMap en cuatro fechas distintas: 6 y 19 de mayo de 1999, 14 de agosto de 2004 y 17 de junio de 2005. Este sensor cuenta con 125 bandas, con intervalo de longitudes de onda comprendido entre 0,45-2,49 μm y una resolución espectral de 0,0150 μm . Por su parte la resolución espacial varía de 5 m (1999) a 4 m (2004 y 2005). Posteriormente dichas imágenes fueron sometidas a correcciones atmosféricas y geométricas [86].

Adicionalmente, durante el periodo de 2005-2007 se tomaron muestras en campo para su análisis en laboratorio (mediante difracción de rayos X y análisis químico), y se tomaron espectros de campo con un espectrómetro ASD, para un intervalo de longitudes de onda 0,4-2,4 μm [86].

Posteriormente, el diagnóstico espectral de los minerales se realizó mediante un software especializado en análisis espectral encargado de comparar la similitud entre las muestras tomadas y las recogidas por una espectroteca con productos de oxidación de piritas elaborada por el Servicio Geológico de Estados Unidos.

De igual modo, se utilizaron programas comerciales desarrollados para realizar la cartografía digital de las imágenes hiperespectrales [86].

b) Metodología utilizada

El procedimiento seguido consiste en una serie de tratamientos a los que son sometidos los datos brutos antes de la fase de interpretación, así como la secuencia de algoritmos utilizados para la extracción de la información geológica y la producción de los mapas deseados [86].

En primer lugar, los datos procedentes de los sensores hiperespectrales deben someterse a tratamientos previos para transformar la información recogida en datos de radiancia. Una vez conocidos los datos de radiancia, se aplican algoritmos para la corrección de los efectos que ejerce la atmósfera y topografía sobre la radiancia del terreno. Finalmente, una vez corregidos los datos de radiancia se transforman en datos de reflectancia, con objeto de interpretar el comportamiento espectral de los objetos utilizando las espectrotecas de referencia.

A continuación, se detalla la secuencia de procesado de imágenes seguida para la extracción de la información geológica según la respuesta espectral.

En primer lugar, las imágenes son sometidas a una serie de tratamientos convencionales de “desmezcla espectral”, que consisten en una identificación de los minerales contenidos en los píxeles de la imagen basada en los rasgos espectrales que posean. De este modo, se suceden varios pasos para reducir la información espectral contenida en la imagen, en forma de máscaras, hasta producir un mapa final que contenga el objeto de estudio, es decir, los minerales de oxidación de pirita existentes.

Se parte de una imagen en falso color, con objeto de distinguir la distribución en la superficie de la vegetación, zonas urbanas, agua y suelo descubierto, la cual es sometida a una serie de tratamientos (Fracción de Ruido Mínimo, Índice de Pureza de Píxeles, Análisis n-dimensional), generándose un mapa de uso de suelo, en el cual se enmascaran la vegetación, agua y áreas urbanas. Posteriormente, repitiéndose la secuencia de tratamientos, se distinguen las zonas ocupadas por residuos mineros del resto de zonas sin vegetación, y volviéndose a someter a los mismos tratamientos, se identifican las zonas oxidadas y las hidratada en las explotaciones mineras abandonadas o activas. Finalmente, se genera el mapa definitivo con las áreas preseleccionadas. A continuación, en la Figura 5-2 se muestra la secuencia simplificada para la elaboración de mapas de productos de la meteorización de piritas a partir de imágenes HyMap desarrollado anteriormente.

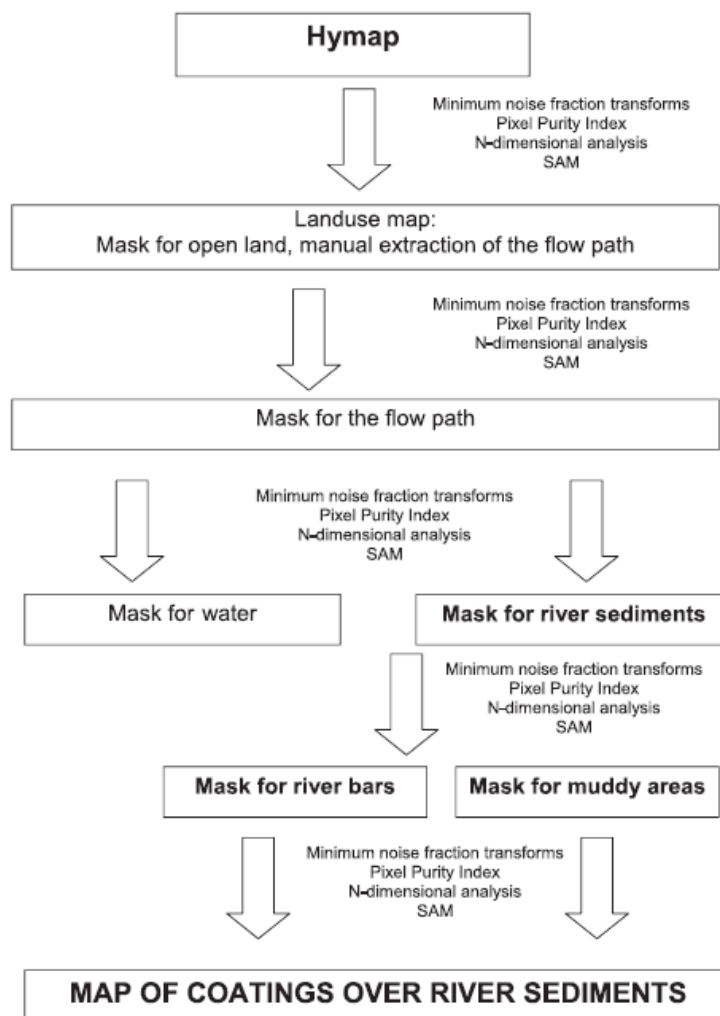


Figura 5-2. Secuencia de algoritmos utilizados para el procesamiento de imágenes capturadas por el sensor HyMap [86].

c) Resultados obtenidos

Como se ha comentado con anterioridad, los datos utilizados para el presente estudio corresponden con los vuelos del sensor HyMap correspondientes a los años 2005, 2008, 2009. Con respecto a la climatología de la zona de estudio, de acuerdo con los informes meteorológicos recogidos por AEMET para dichos años, indicar que el verano de 2005 resulto ser extremadamente cálido y seco, en comparación con el verano cálido y muy húmedo de 2008 y muy cálido y muy seco de 2009 [86] [88] [90].

Por su parte, a continuación, se muestran los mapas finales sobre los cuales se identifican las costras de minerales precipitados sobre los sedimentos a lo largo del transcurso del río Odiel, en la zona correspondiente a la mina Sotiel (Huelva). La Figura A se corresponde con el mapa del 17 de junio de 2005; la Figura B se corresponde con el mapa del 4 de agosto de 2008; y la C con el del 13 de agosto de 2009.

Cabe indicar que, los colores rojizos situados sobre la cuenca indican aquellas zonas donde se registra oxidación intensa, mientras que los colores verdosos y azulados indican las zonas de mayor hidratación.

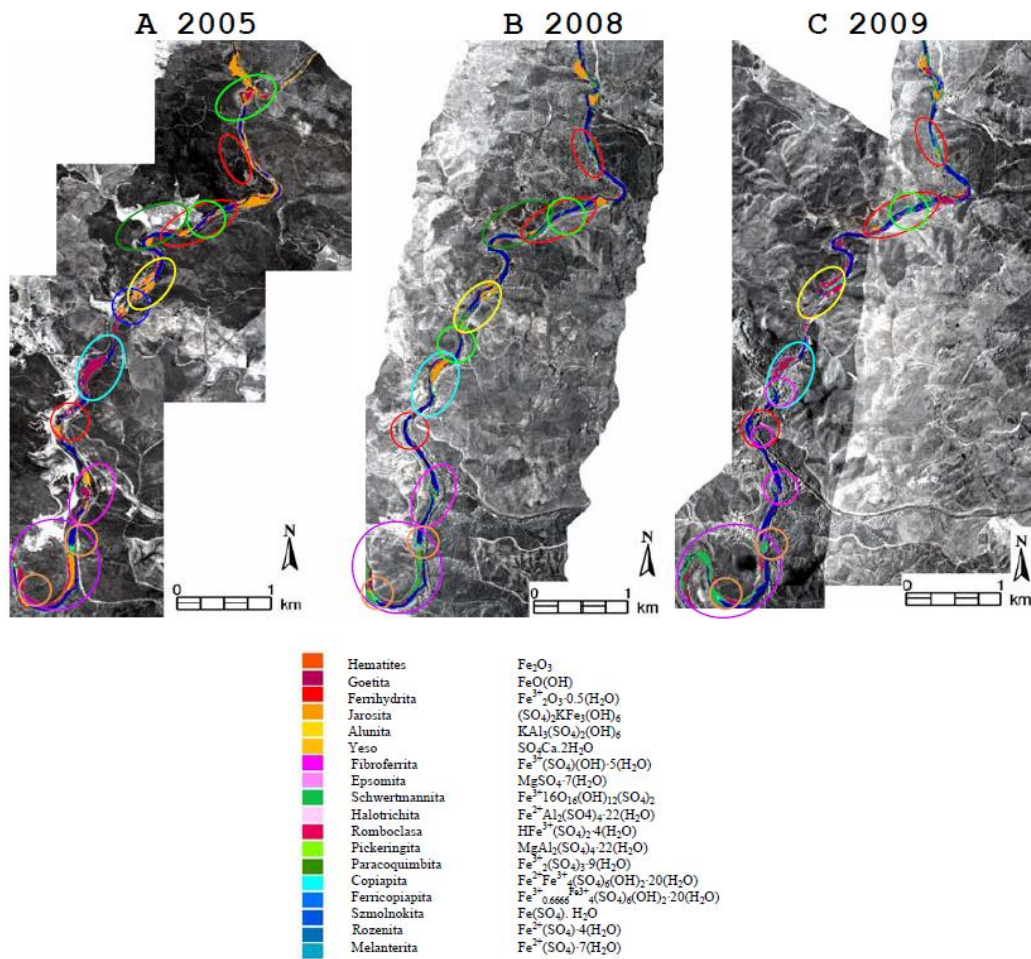


Figura 5-3. Mapa de las costras precipitadas sobre sedimentos fluviales (diagnosticados mineralógicamente mediante espectroscopia de referencia) en las escombreras de las minas en el curso medio (mina Sotiel) del río Odiel (Huelva), para los años 2005 (A), 2008 (B) y 2009 (C) [86].

Por su parte, según los resultados obtenidos, en el verano de 2005 (Figura 5-3.a) se observa que la formación de costras de minerales precipitados sobre los sedimentos del tramo de río estudiado responde a una oxidación intensa, aumentando las zonas cubiertas por sulfato de hierro, en comparación con los años 2008 y 2009. Asimismo, es en el verano de 2005 cuando se registra el mayor grado de oxidación de los minerales precipitados sobre los sedimentos de todo el periodo analizado.

En cuanto a la evolución mineralógica del área de estudio, se aprecia que varía en función de la distancia a la escombrera de mayores dimensiones situadas a orillas del río Odiel, coincidiendo con la mayor fuente de contaminación de la zona.

En el verano de 2008, cálido y muy húmedo y, como consecuencia de las fuertes lluvias primaverales que lo preceden, se registra un considerable aumento del nivel de agua en el río con respecto al 2005, lo cual concuerda con los resultados obtenidos que muestran una disminución de la oxidación de las costras de precipitados sobre los sedimentos. En la (Figura 1.b) se muestran los minerales dominantes en cada zona.

En el verano de 2009, caracterizado por ser muy cálido y seco, y con una disminución del nivel del agua con respecto al año anterior, se registra un ligero aumento de la oxidación de las costras minerales sobre los sedimentos. Asimismo, hay una mayor presencia de minerales hidratados en superficies fangosas, las cuales se encontraban inundadas en el año 2008. (Figura 1.c), círculos magenta).

d) Conclusiones

A continuación, se listan las principales conclusiones extraídas a raíz de los estudios multitemporales realizados del estudio de los sedimentos en el cauce del río Odiel (Huelva).

- Las minas abandonadas son áreas favorables para la concentración de sulfuros de hierro como fuente de generación de aguas ácidas.
- Los residuos de lodos se encuentran más afectados por cambios producidos por tormentas estivales de corta duración. Por el contrario, las escombreras ofrecen mayor resistencia a una meteorización rápida, respondiendo de manera más lenta a los cambios atmosféricos con respecto a los lodos. Ello está directamente relacionado con el tamaño de partícula y la cantidad de huecos.
- Los mapas obtenidos mediante el tratamiento digital de las imágenes hiperespectrales muestran la tendencia de la meteorización de pirita en balsas de lodos y escombreras, y su relación con los efectos de las variaciones climáticas durante largos periodos de tiempo. Con ello se persigue registrar el comportamiento de parámetros geológicos locales favoreciendo la automatización de las cartografías de minerales, para así poder anticipar las técnicas de mitigación de los impactos ocasionados por el drenaje ácido de mina.
- Para obtener los mapas representativos de los minerales secundarios producto de la meteorización de piritas resulta indispensable aplicar un procedimiento secuencial al de tratamiento de imágenes, que consigan aislar digitalmente las zonas de interés. En este sentido, resulta indispensable enmascarar las zonas cubiertas por vegetación, u otros usos del suelo que entorpezcan la interpretación. Este proceso es diferente para cada escena tomada y para cada fecha. Así, una cartografía fiable es crítica para una correcta interpretación de la estimación de contaminación por metales en las aguas y, por consiguiente, la predicción del AMD.
- Es necesario el uso de una espectrooteca local de la zona de estudio, que permita dar una explicación a las variaciones puntuales que presentan las imágenes hiperespectrales, con respecto a los datos de referencia disponibles, esto es, las librerías espectrales de referencia, así como las medidas tomadas en campo y analizadas en laboratorio.

Caso de estudio 2: Monitorización de la evolución de las aguas ácidas en el río Odiel utilizando imágenes hiperespectrales

El estudio de la evolución del pH de los lixiviados mineros, utilizando imágenes captadas por sensores hiperespectrales, es una técnica emergente cuyo estudio es limitado, en comparación con la cartografía de minerales producto de oxidación de piritas mediante su respuesta espectral, la cual ha sido ampliamente estudiada durante más de una década. Fruto de estos estudios se ha logrado elaborar un patrón de distribución espacial de los minerales en los sitios mineros, el cual sugiere una disminución del potencial AMD como función de la distancia a la zona donde se encuentra la zona del yacimiento minero [85].

Así, en este epígrafe se presentan de manera resumida estudios realizados en el entorno del río Odiel [85], concretamente en la zona correspondiente al Complejo minero Sotiel-Migollas, para elaborar mapas predictivos de la contaminación del río mediante datos obtenidos de sensores hiperespectrales. Estos mapas se basan en las características espectrales del agua, relacionando el color que este presenta con los cambios de pH asociados a la contaminación del río ocasionada por los residuos minerales con alto contenido en sulfuros de hierro [85].

Con la realización de dichas investigaciones se persigue llevar a cabo patrones de distribución espacial que sirvan para monitorizar el impacto ocasionado por los residuos mineros en el tiempo, y facilitando la detección de la contaminación en el entorno ambiental del sitio minero. Asimismo, se pretende llevar a cabo un registro de los parámetros locales para elaborar una secuencia de monitorización que complemente los métodos tradicionales utilizados hasta la fecha [85] [87]. Todo ello supone un desafío, teniendo en cuenta la extensión y el volumen de los residuos mineros. No obstante, este nuevo método de monitorización puede ayudar a entender la magnitud de este problema, así como a anticipar la implantación de posibles técnicas de remediación [85].

A continuación, se resume el procedimiento llevado a cabo durante las investigaciones seleccionadas, así como las principales conclusiones extraídas a raíz de los resultados obtenidos.

a) Adquisición de datos

Por un lado, se utilizaron imágenes de la cuenca del río Odiel captadas por el sensor HyMap, correspondientes al 1 de agosto de 2008 y 13 de agosto de 2009 [87]. Se trata de un sensor hiperespectral aerotransportado, el cual dispone de 126 bandas espectrales, con un rango espectral comprendido entre 436-2485 nm. Posteriormente las imágenes brutas captadas por el sensor fueron sometidas a una geocodificación usando un software paramétrico y a una corrección atmosférica (ATCOR4) [87].

Adicionalmente, fueron tomadas medidas de espectros de campo, así como del pH a lo largo del transcurso del río Odiel. También se seleccionaron espectros de campo de una librería de más de 500 especies, para la ubicación correspondiente, junto con medidas locales de pH y antecedentes de observaciones geológicas de la zona. Para la recogida de espectros de campo se ha utilizado un espectrómetro de campo ASD FieldSpec 4 (350-2500 nm) y una resolución espectral de 1 nm.

Finalmente, se tomaron muestras de agua del río para los mismos días que fueron realizados los vuelos, en seis puntos diferentes a lo largo del curso del río. Los parámetros fisicoquímicos medidos en campo fueron temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto y potencial redox.

b) Metodología empleada

En primer lugar, las imágenes captadas por el sensor HyMap han de someterse a un procedimiento secuencial que consta de los mismos tratamientos y algoritmos a los que se sometía la imagen para la cartografía de los sedimentos en el río (apartado 3.1). No obstante, en este caso se persigue un objetivo

distinto: elaborar un mapa de la corriente de aguas ácidas que fluye a través del cauce del río. Esta secuencia específica de procesado de imagen se muestra a continuación en la siguiente Figura.

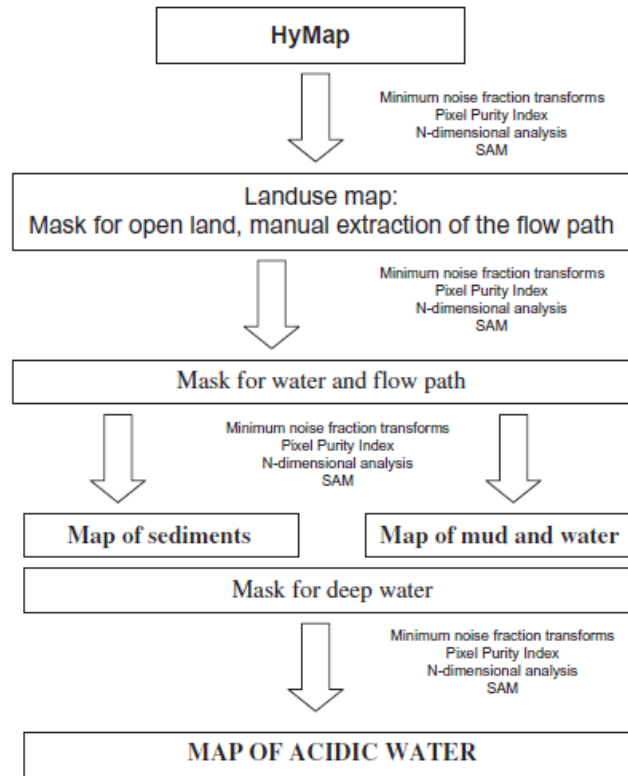


Figura 5-4. Secuencia de procesado de imagen hiperespectral para la obtención de un mapa de aguas ácidas contaminadas [87].

Se parte de una imagen en falso color captada por el sensor HyMap (Figura 5-5.a). De acuerdo con el Caso de estudio anteriormente expuesto, se ha de elaborar un mapa de los sedimentos a lo largo del río (Figura 5-5.d), para lo cual se ha de enmascarar previamente el flujo de agua del río (Figuras 5-5.b y c). A partir de la máscara en la cual se han aislado los componentes de agua y lodos (Figura 5-5.e) se construye su correspondiente mapa (Figura 5-5.f). El paso final consiste en generar, a partir del mapa anterior, una máscara para aguas profundas (Figura 5-5. g), generándose de esta forma un mapa en el cual únicamente se muestre la respuesta espectral de las aguas ácidas (Figura 5-5.h).

A continuación, se muestran las escenas correspondientes a la secuencia de procesado de la imagen anteriormente explicada.

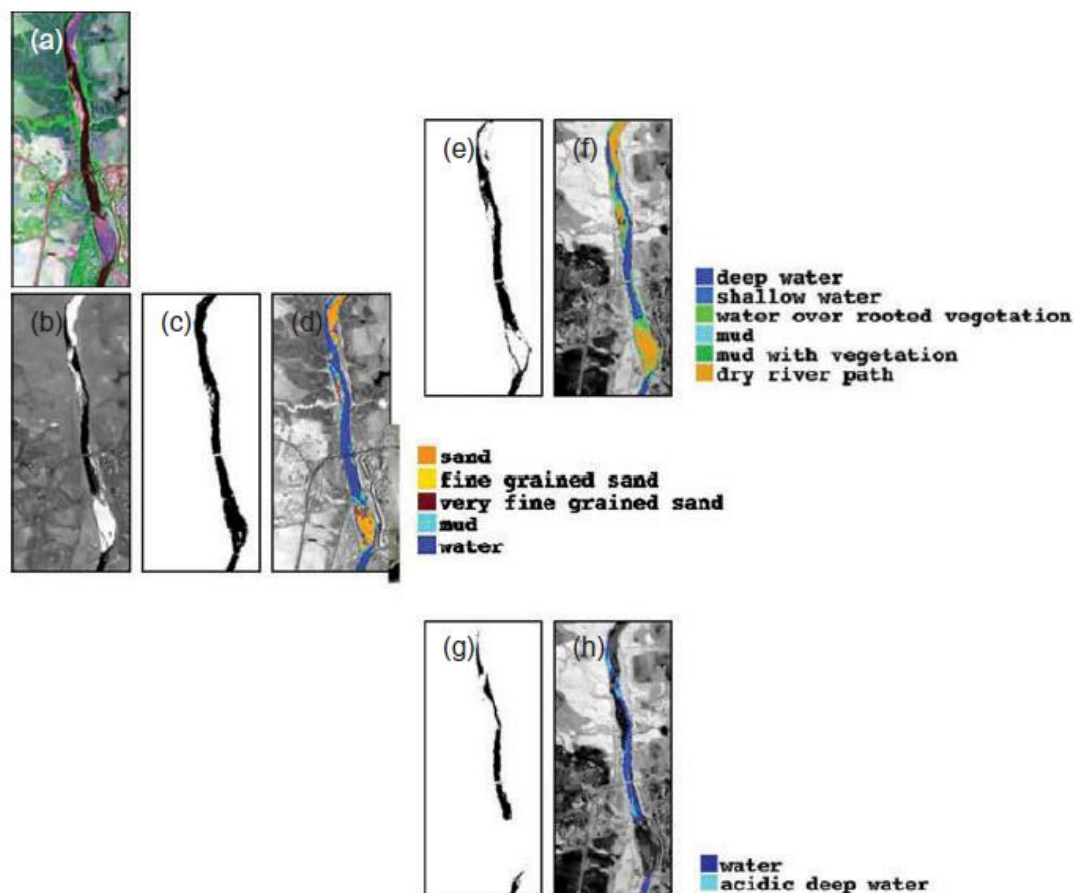


Figura 5-5. Escenas correspondientes a la secuencia de procesado de imagen hiperespectral para la obtención de un mapa de contaminación de aguas ácidas por drenaje ácido de mina en el río Odiel (Huelva) [87].

Cabe destacar que, el mapa final obtenido muestra únicamente las zonas donde el sensor HyMap ha detectado la respuesta espectral de las aguas ácidas, en zonas donde predomina la presencia de sedimentos y la dinámica de la corriente de agua.

No obstante, el en el resto de zonas, la respuesta espectral queda dominada por la presencia de vegetación y la influencia de la profundidad. Así, una vez identificadas dichas zonas, se procedió a identificar las características espectrales asociadas a la influencia del pH del agua.

Por un lado, se evaluó la afección de un afluente altamente contaminado sobre la corriente principal del río, en cuanto a las variaciones en el pH aguas arriba y aguas debajo de dicha confluencia.

Por otro, se estudió la influencia de escombreras y otras unidades de proceso de un Complejo minero (Sotiel), situado a orillas del propio río. En ese sentido, se seleccionaron una serie de puntos de muestreo representativos en zonas donde, como consecuencia de la disminución artificial del flujo de agua provocada por la presencia de barreras, se han generado piscinas de agua ácida estancada.

Finalmente, se realizó un análisis espectral donde se evaluaron las características espectrales de las distintas superficies estudiadas. Para ello, se seleccionó como área de estudio la desembocadura del flujo de agua en el estuario, debido principalmente al ensanchamiento del canal, lo cual permite una mayor cobertura de agua. Los resultados arrojados por dicho análisis fueron posteriormente contrastados con las medidas espectrales de campo, y con las medidas de pH realizadas.

c) Resultados obtenidos

En base al procedimiento descrito con anterioridad, se obtuvieron los siguientes resultados [87].

Con respecto a la evaluación de la influencia que ejerce una corriente altamente contaminada con residuos mineros sobre el cauce principal del río Odiel, en la Figura 5-6 se muestra una evolución temporal de la misma mediante una serie de mapas, en los que aparece la caracterización de las masas de agua identificadas, así como la evolución del pH, junto con un mapa de temperatura y precipitación de España.

Es preciso indicar que, únicamente pudieron ser estudiados los cambios en el pH en el año 2008, debido a que el flujo aguas arriba de la confluencia estaba seco en verano de 2009. (círculo amarillo, Figuras 5-6. a y c).

Según el mapa de la evolución de pH obtenido para verano de 2008 (Figura 5-6.a), los espectros que muestran una menor contaminación ácida, con un pH de 6 (color azul) se corresponden con la corriente aguas arriba de la confluencia del afluente altamente contaminado; la respuesta espectral para agua básica profunda (pH 8) se corresponde con la zona cercana al estuario. Aguas debajo de la confluencia, se observa una acidez intermedia (con un pH en torno a 3) la cual encuentra su máximo (pH<3) en las áreas donde la corriente se estrecha y el flujo de agua disminuye, presentando además una clara influencia de vegetación (Figura 5-6.a, círculo azul).

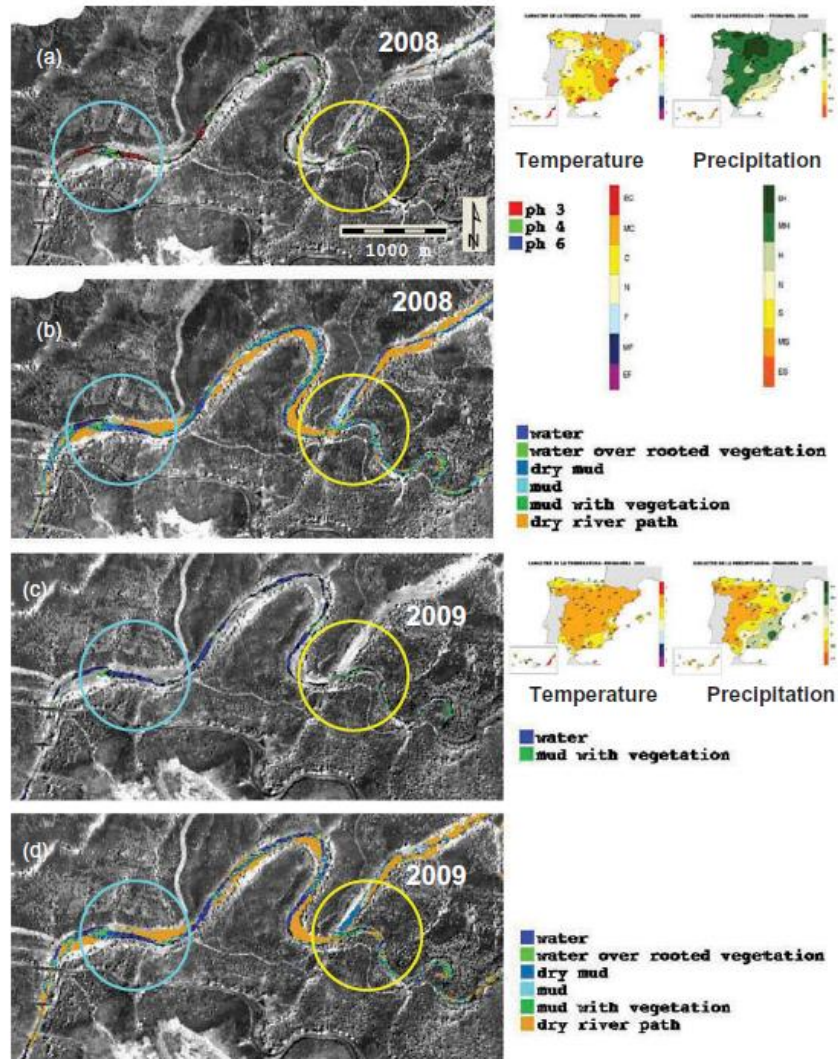


Figura 5-6. Mapas de evolución de la contaminación a lo largo del río Odiel (Huelva) (izq.). Mapas de temperatura y precipitación en España para los años 2008 y 2009 (dcha.) [87].

En referencia a influencia de la presencia de escombreras y otras unidades correspondientes al Complejo minero Sotiel, situado a orillas del río Odiel, se muestran los mapas de la evolución del flujo de agua a lo largo del entorno del sitio minero una vez procesadas las imágenes. En todos ellos (correspondientes a los veranos de 2005, 2008 y 2009) hay ciertas zonas donde coincide la concentración de aguas ácidas. En el verano de 2005, caracterizado por un clima seco y templado, y con el menor nivel de río registrado (Figura 5-7. b), las respuestas espectrales de aguas ácidas son mayores. En cambio para 2008, donde se registró un mayor nivel de agua, el área de aguas ácidas detectada es inferior (Figura 5-7.c).

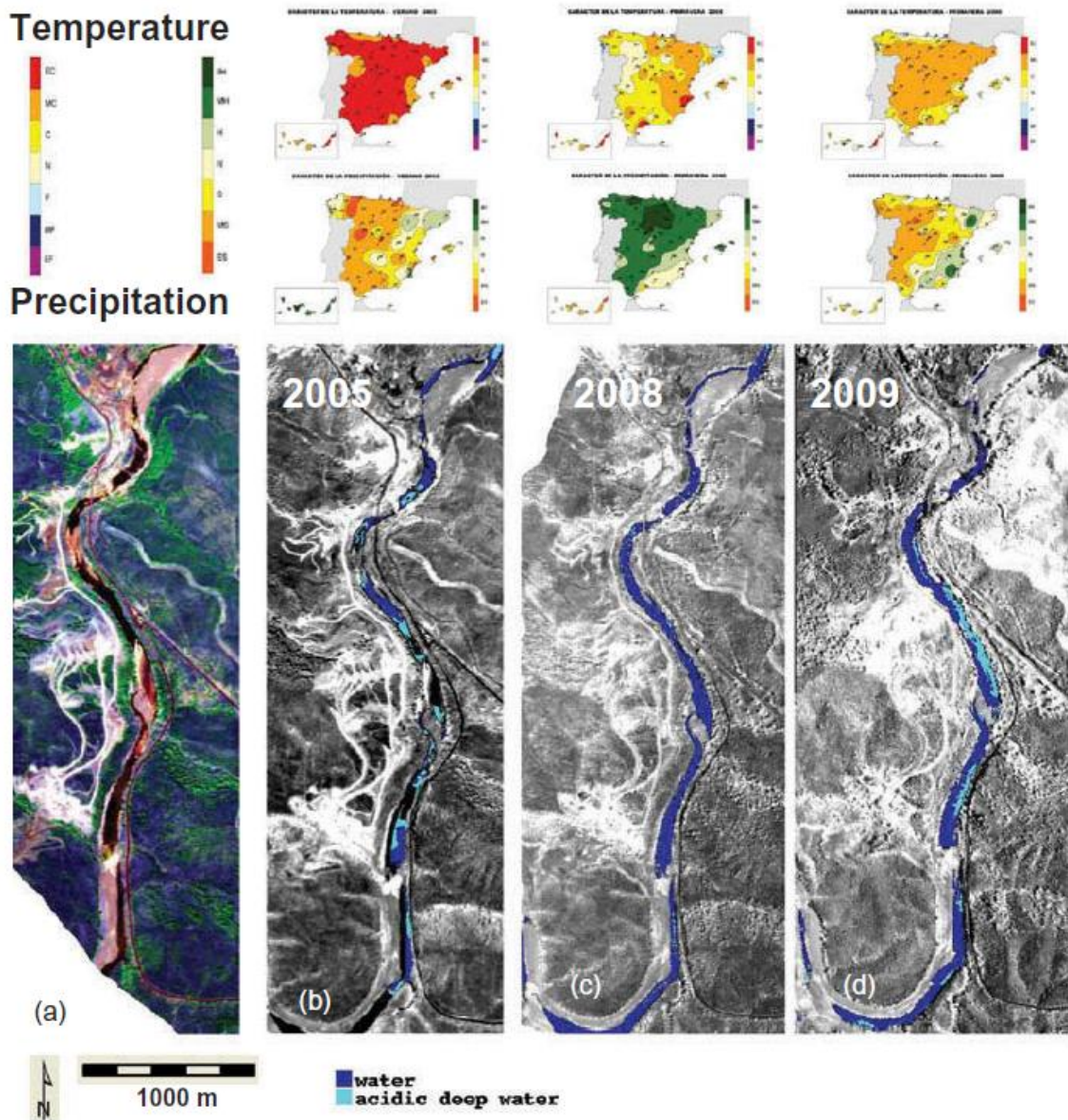


Figura 5-7. Mapas del entorno del río correspondiente con el sitio minero: (a) Imagen en falso color; (b)-(d) mapas de agua para los años 2005, 2008 y 2009 (abajo). Mapa de España temperaturas y precipitaciones en 2005, 2008 y 2009 (arriba) [87].

Finalmente, se muestra un mosaico representativo de la comparación realizada, para el año 2008, entre los datos reflejados por las imágenes del sensor HyMap y las respuestas espectrales de los sedimentos medidos en campo mediante el espectrómetro ASD Fieldspec 3 (A)-(H), en cada una de las áreas (a)-(h), que fueron captadas por el sensor hiperespectral.

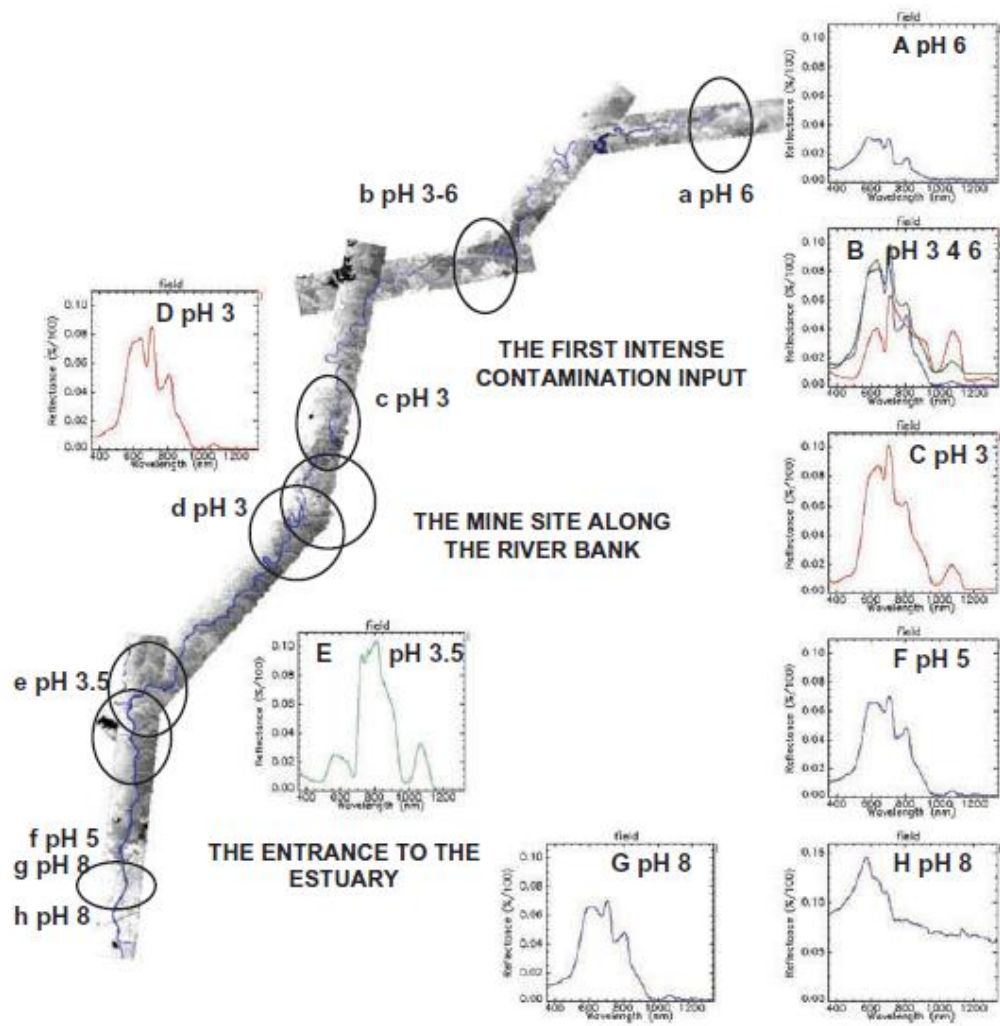


Figura 5-8. Mosaico con los vuelos cubiertos por el sensor HyMap sobre la cuenca del río Odiel en 2008. (A)-(H): Espectros medidos en campo en los diferentes puntos de medida (a)-(h) [87].

d) Conclusiones

A raíz de la discusión llevada a cabo para comparar los datos arrojados por las imágenes del sensor HyMap y los espectros medidos en campo se concluyó lo siguiente [85] [87]:

- Cartografiar las aguas ácidas procedentes de residuos mineros que contaminan un río requiere un entendimiento completo del sistema (sedimentos, parámetros geomorfológicos, presencia de vegetación, climatología del entorno).
- Previamente a elaborar mapas de precipitación de los sulfatos disueltos en el río, es necesario crear los mapas de uso de tierras secas, fangos, agua con vegetación y agua superficial, para alcanzar las áreas donde pueda ser detectada la respuesta espectral de aguas ácidas.
- La evolución temporal de las piscinas de aguas ácidas está fuertemente controlada por el nivel de agua del río, como consecuencia del ratio de precipitaciones que presente la zona en el periodo de estudio.
- Los mapas de aguas ácidas creados a partir de las imágenes hiperespectrales no pueden ser directamente traducidos a mapas de calidad de las aguas, no obstante, suponen un indicador de gran utilidad.
- Los programas convencionales de monitorización de la calidad de las aguas están basados en análisis químicos de muestras recogidas regularmente en puntos concretos del área de estudio, y en análisis de parámetros físicos medidos a lo largo del cauce del río. En ese sentido, utilizar imágenes hiperespectrales para controlar el grado de contaminación de las aguas por drenaje ácido de mina supone una base sólida para el desarrollo de nuevos sistemas multitemporales de monitorización de la calidad de las aguas.

5.2 Observación satelital de la evolución de lagos contaminados por aguas ácidas de mina en el distrito de Çan (Çanakkale, Turquía)

El condado de Çan, situado en la provincia de Çanakkale, es uno de los mayores distritos mineros de carbón de Turquía. Desde la década de los 80 han sido numerosas las compañías que han estado explotando los depósitos de carbón existentes, en su mayoría a pequeña y mediana escala. Estas compañías solían operar durante periodos cortos de tiempo para luego abandonar la zona de operación sin llevar a cabo ningún tipo de rehabilitación del área afectada. Como consecuencia, se han ido formando lagos artificiales debido a descargas superficiales y filtraciones subterráneas, en las superficies abandonadas con alto contenido en sulfuros, adquiriendo un carácter ácido debido a la oxidación de la pirita. Estos lagos artificiales de drenaje ácido de mina se conocen como AML.

Con objeto de comprobar el desarrollo de un sistema de monitorización que caracterice los posibles cambios en los AML en zonas de minería de lignitos a cielo abierto a escala regional, se ha seleccionado un estudio llevado a cabo en dicha zona por los investigadores Yucel, D.A., Yucel, M.A y Ileri, B [92], el cual será descrito a continuación.

5.2.1 Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio seleccionada se encuentra a 17 km al sudeste de la región de Çan, perteneciente a la provincia de Çanakkale, al noroeste de Turquía (Figura 5-9). Debido a las características geológicas de la zona se trata de un área ligada a explotaciones mineras (a cielo abierto y subterráneas) para la obtención principalmente de carbón.

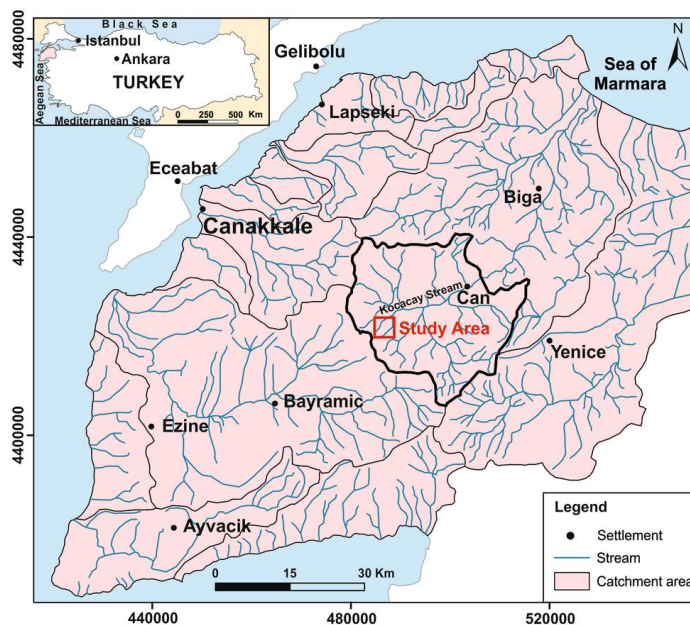


Figura 5-9. Situación geográfica de la región de estudio [92].

En cuanto al clima, la región de Çanakkale se caracteriza por una transición entre zonas con clima mediterráneo y otras con clima del mar Negro. De acuerdo a datos de estaciones meteorológicas cercanas, se caracteriza por veranos cálidos y secos, inviernos relativamente húmedos y fríos, mientras que la mayor tasa de precipitaciones se da en invierno.

En referencia a la geología de la zona de estudio, esta se compone por una sucesión de rocas volcánicas

enriquecidas con alto contenido en sulfuros.

Por su parte, la mayoría de arroyos y riachuelos situados dentro de la zona de estudio drenan en el río Kocaçay, el cual fluye al noreste entre los condados de Çan y Biga, con desembocadura en el mar de Mármara (situado a 45-50 km de Çan). Concretamente, el estudio se centra en nueve lagos de agua ácida situados a una altura en torno a 128-245 metros sobre el nivel del mar. El drenaje de dichos lagos ocasiona la descarga de aguas ácidas procedentes de los residuos mineros en el cauce del río Kocaçay. Los productos de meteorización por oxidación de sulfuros dan lugar a la formación de hidróxido de hierro, un precipitado de color rojizo/anaranjado que contamina las corrientes afectadas por AMD.

5.2.2 Adquisición de datos

Para la realización del estudio se optó por imágenes de satélite, aprovechando la gran cobertura que ofrecen, con un gran volumen de información disponible, factor requerido debido al objetivo de llevar a cabo un análisis multitemporal de décadas (1977-2011) a gran escala.

Por tanto, se tomaron imágenes del área de estudio procedentes de la serie Landsat (Landsat, Landsat 5 y Landsat 7) para los años 1977, 1985, 1987 y 1999; e imágenes de los satélites Quickbird y Worldview, para los años 2003, 2008 y 2011.

Las características técnicas de dichos satélites se encuentran recogidas en el apartado 3.6.1 (Tablas 3-1,2 y 3).

5.2.3 Procedimiento empleado

Las imágenes obtenidas por satélite, una vez sometidas a tratamientos previos de corrección geométrica, fueron importadas a un software especializado. A través de dicho programa se digitalizaron los bordes de la superficie de los lagos (de forma automática en el caso de las imágenes captadas por Quickbird y Worldview) [92].

Una vez definidos todos los bordes, el programa llevó a cabo un análisis de las series temporales, convirtiendo los bordes en datos vectoriales. De este modo, los cambios en el área y perímetro quedaron registrados mediante tablas. A partir de los datos, se crearon mapas temáticos de los AML para su interpretación gráfica [92].

Adicionalmente al tratamiento digital de las imágenes, se tomaron muestras de agua en cada uno de los lagos para su análisis en laboratorio, durante el verano de 2012. Con ello se determinaron parámetros físicos típicos (pH, potencial redox, temperatura, salinidad, conductividad eléctrica), así como parámetros físicos como el contenido en aniones y cationes, y otros elementos [92].

5.2.4 Resultados obtenidos

A partir de los resultados obtenidos se observa que los lagos 2 y 3 son los de mayor antigüedad; mientras que los 4 y 5 son los últimos en formarse. De ellos, el lago número 5 se sitúa en un antiguo cauce, formado debido a la prevención de la contaminación del flujo de agua por la acumulación de residuos mineros. La evolución temporal del crecimiento y aparición de los AML captada por los sensores satelitales se presenta a continuación en la siguiente Figura.

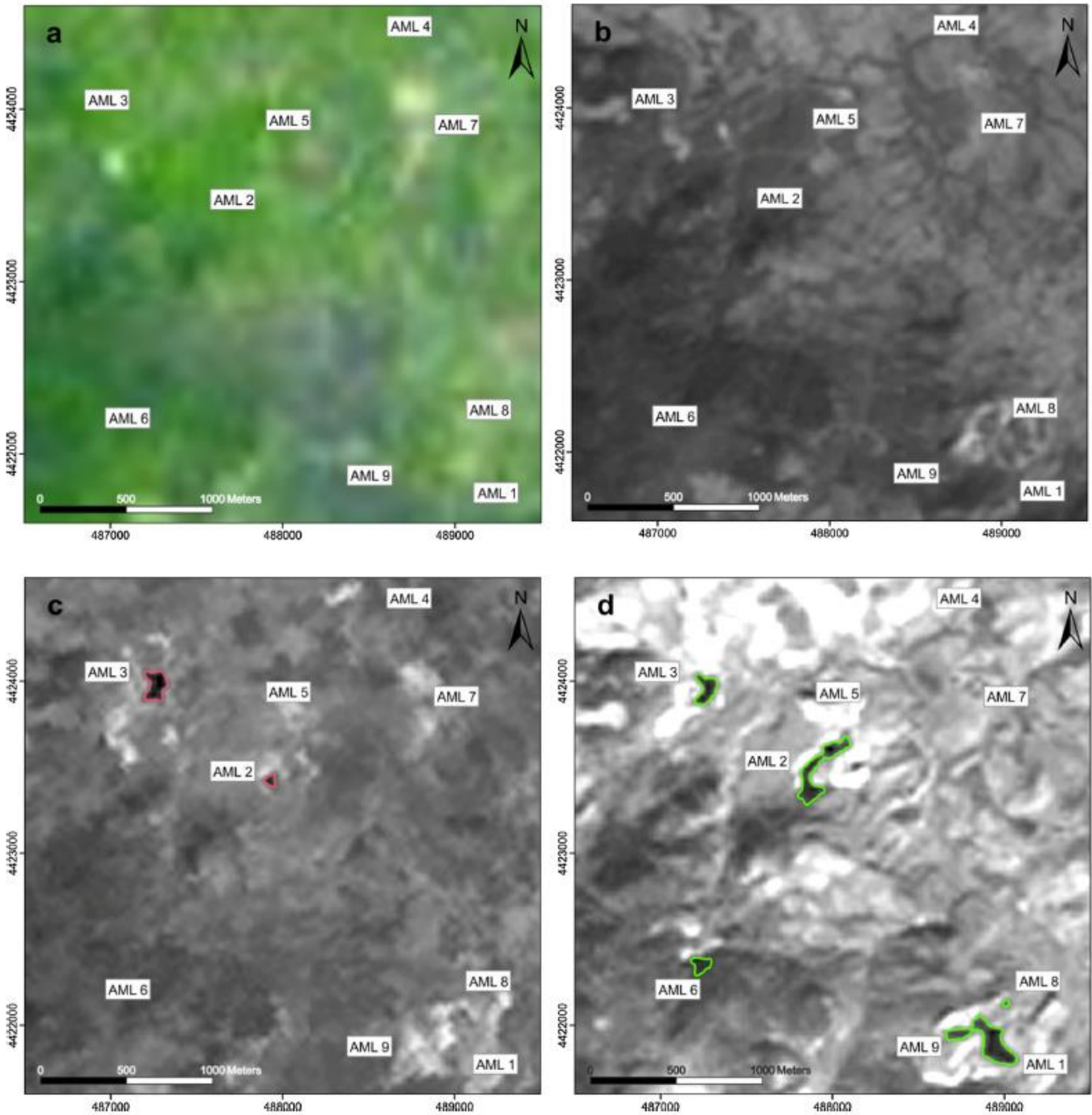


Figura 5-10. Imágenes captadas por sensores satelitales para la detección de formación y evolución de los AML en Çan (Turquía): (a) 1977; (b) 1985; (c) 1987; (d) 1999 [94].

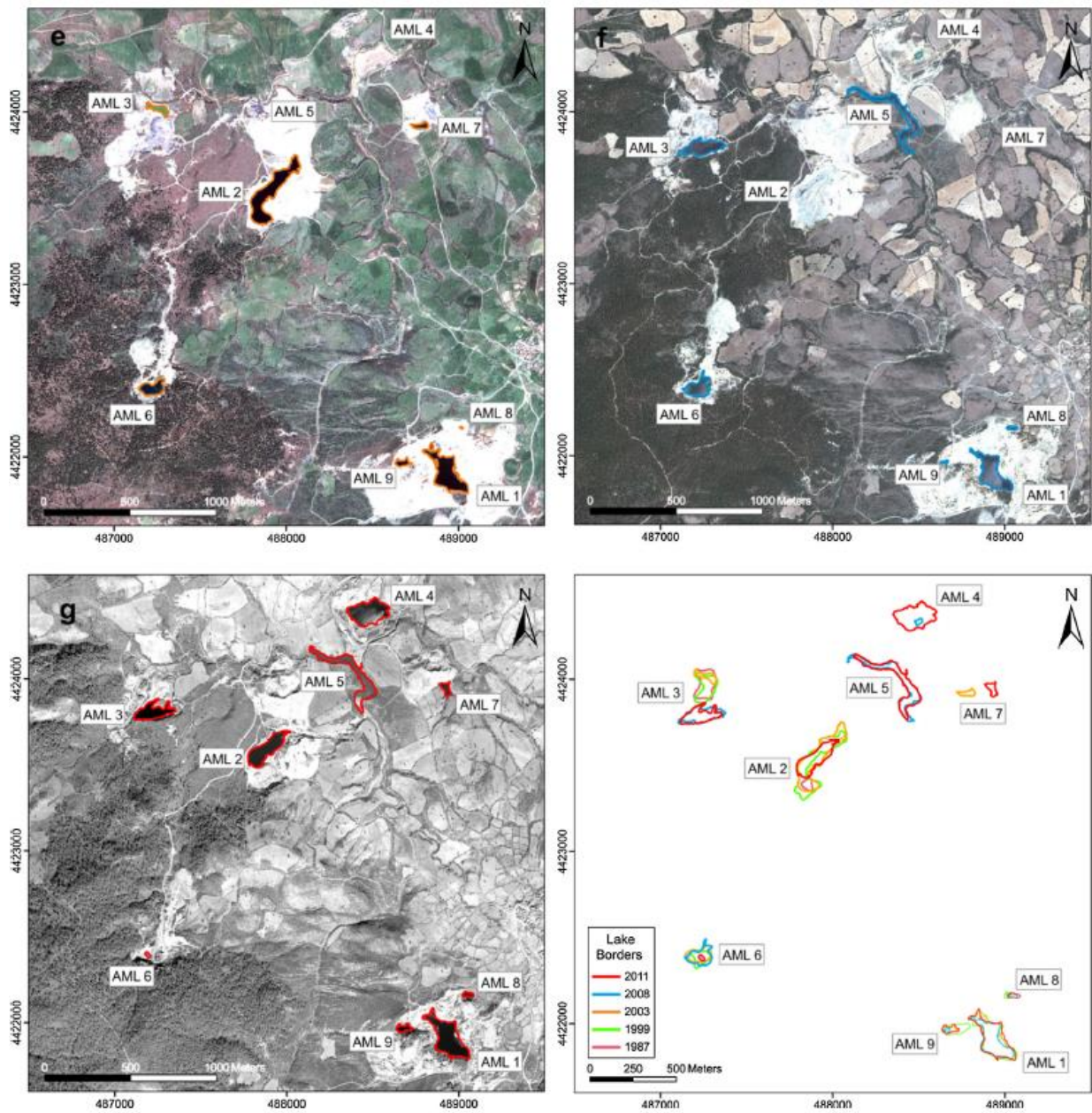


Figura 5-11. (Cont.) Imágenes captadas por sensores satelitales para la detección de formación y evolución de los AML en Çan (Turquía): (e) 2003; (f) 2008; (g) 2011; (h) Evolución multitemporal [92].

En cuanto a los parámetros de campo analizados, en las siguientes gráficas se resumen los resultados obtenidos.

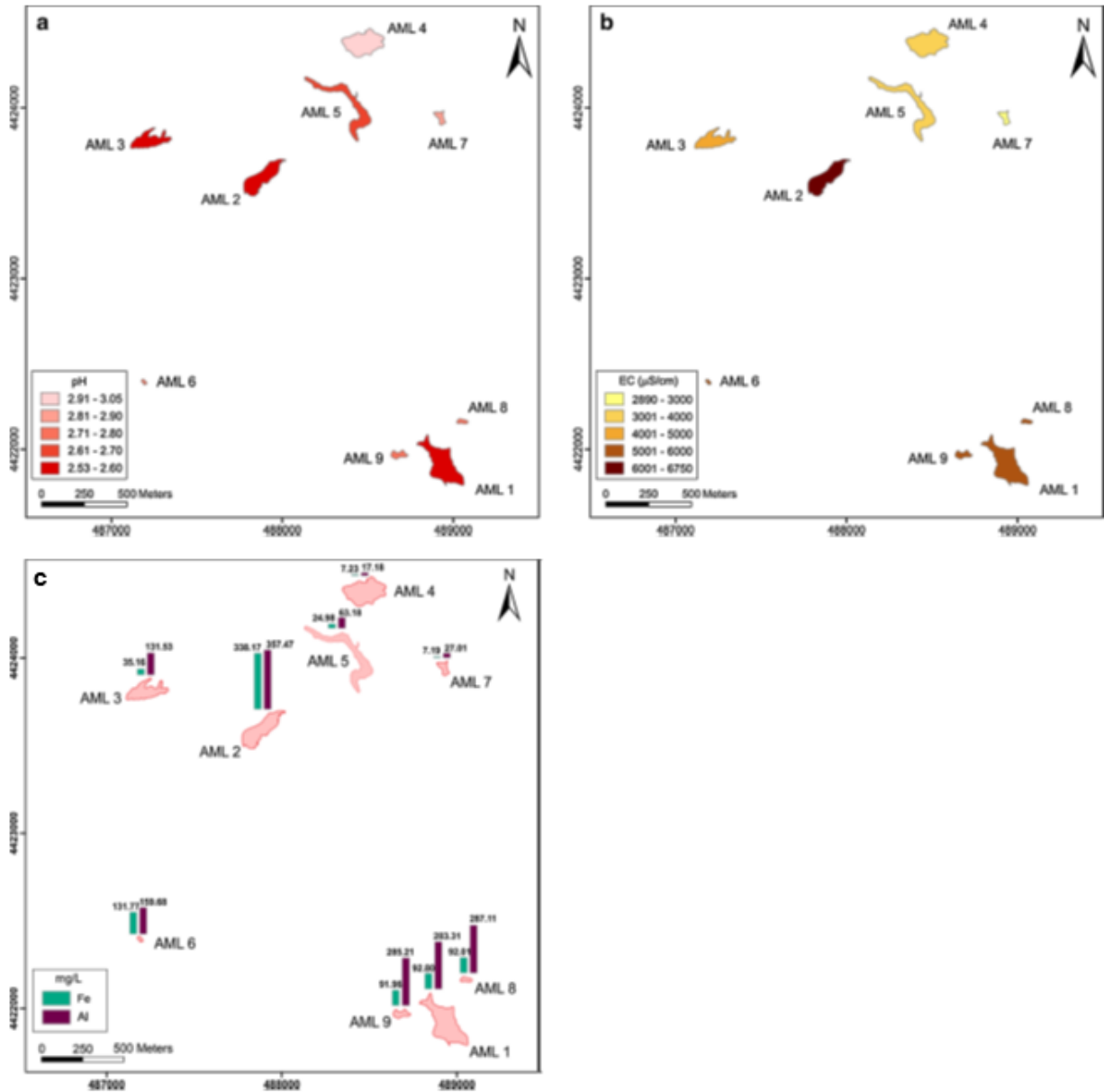


Figura 5-12. Resultados obtenidos de los parámetros de campo analizados en agosto de 2012: (a) pH; (b) Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); (c) Concentraciones de Fe y Al (mg/L) [92].

Para evaluar la toxicidad acuática se midió el pH de la solución, registrándose valores comprendidos entre 2,53 y 3,05.

Por otro lado, la conductividad eléctrica (EC) se utiliza como indicador de la alta concentración de sólidos en suspensión, principalmente sulfato ($\text{pH}<3$), y hierro. Se registraron valores entre 2,89-6,75 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto a la concentración de los metales en los lagos, indicar que el hierro y aluminio son las especies predominantes en la superficie de estudio. Las altas concentraciones registradas dan lugar a un incremento en la acidez del agua.

5.2.5 Conclusiones

Las principales conclusiones extraídas tras llevar a cabo el estudio fueron las siguientes [92].

- Como consecuencia de las actividades mineras de explotación de lignitos en el condado de Çan han ido formándose lagos artificiales de aguas ácidas (AML). Dichos lagos suponen una fuente de contaminación más peligrosa aún que el Drenaje Ácido de Minas en ríos, debido al elevado volumen de agua ácida que se concentra en los lagos.
- Los lagos artificiales dan lugar a infiltraciones que afectan a las fuentes de agua potable de las poblaciones cercanas a su ubicación. Por tanto, es necesario desarrollar una estrategia común para llevar a cabo una gestión de las aguas continentales y subterráneas para preservar la calidad de las mismas.
- Se requiere un sistema multidisciplinar para reducir los problemas económicos y ecológicos ocasionados dentro de las áreas mineras en operación y abandonadas. Así, es fundamental llevar a cabo un registro de la información espacial y temporal de los diferentes parámetros de control en cada fase del proceso para estimar la evolución de los lagos a lo largo del tiempo. En ese sentido, las técnicas de Teledetección permiten obtener la información multitemporal permitiendo una visión a escala regional.

5.3 Detección de residuos mineros y Drenaje Ácido de Mina utilizando imágenes captadas por el satélite Worldview-3 en la región de Sulitjelma (Noruega)

Como se ha podido comprobar en epígrafes anteriores, algunos de los minerales precipitados asociados al AMD poseen características espectrales distintivas del resto, capaces de ser identificadas usando las técnicas adecuadas de Teledetección, con objeto de identificar y monitorizar la contaminación por Drenaje Ácido de Mina ocasionada por los residuos mineros.

En ese sentido, los satélites que han sido ampliamente utilizados en la detección de minerales son los satélites multiespectrales ASTER e Hyperion, aunque la resolución espacial que ofrecen es limitada para la captación de áreas con mayor detalle. Para tal propósito son más adecuadas las imágenes captadas por satélites aerotransportados.

No obstante lo anterior, con el lanzamiento en 2014 del satélite comercial WorldView-3 se consiguió mejorar significativamente la resolución espacial y espectral hasta el momento, lo cual permitió que dicho satélite fuese capaz de distinguir los diferentes minerales a una menor escala.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha seleccionado una investigación al objeto de evaluar la aplicación de las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) en la detección de la distribución espacial de los residuos mineros, la contaminación por Drenaje Ácido de Mina y su impacto en la vegetación de la zona [93].

El proyecto seleccionado, realizado por Davids, C., transcurre en la región de Sulitjelma, situada al norte de Noruega. Se trata de una zona caracterizada por una intensa actividad minera, dejando numerosas minas abandonadas. En su mayoría se localizan en pequeñas áreas montañosas, cuyo acceso para su monitorización y control resulta limitado y costoso.

Asimismo, la identificación de las minas existentes en la zona de estudio servirá para el desarrollo de programas de monitorización a escala regional, debido a que la Compañía promotora se plantea retomar la actividad de dichas minas, clausuradas en 1991.

5.3.1 Descripción de la zona de estudio

Sulitjelma se sitúa al este de la región montañosa de Bodø, en el norte de Noruega. Por su parte, la actividad minera tiene lugar en las cadenas montañosas situadas alrededor del lago Langvatnet. Los yacimientos, caracterizados por un elevado contenido en depósitos de sulfuros, han sido explotados para la obtención de cobre y cinc principalmente durante alrededor de cien años.

El proceso de extracción era llevado a cabo principalmente en minas subterráneas situadas en 18 localizaciones distintas comprendidas entre la zona de Sulitjelma y Langvatnet. Asimismo, se las actividades de exploración se han extendido a lo largo de 130 ubicaciones distintas, dando lugar a la dispersión de residuos mineros en la zona montañosa.

Así, los cien años de intensa actividad minera para la obtención de cobre y cinc han dado lugar al drenaje de agua superficial y subterránea procedente de los sitios mineros al lago Langvatnet, el cual ha sido contaminado por Drenaje Ácido de Mina y alto contenido en metales pesados.

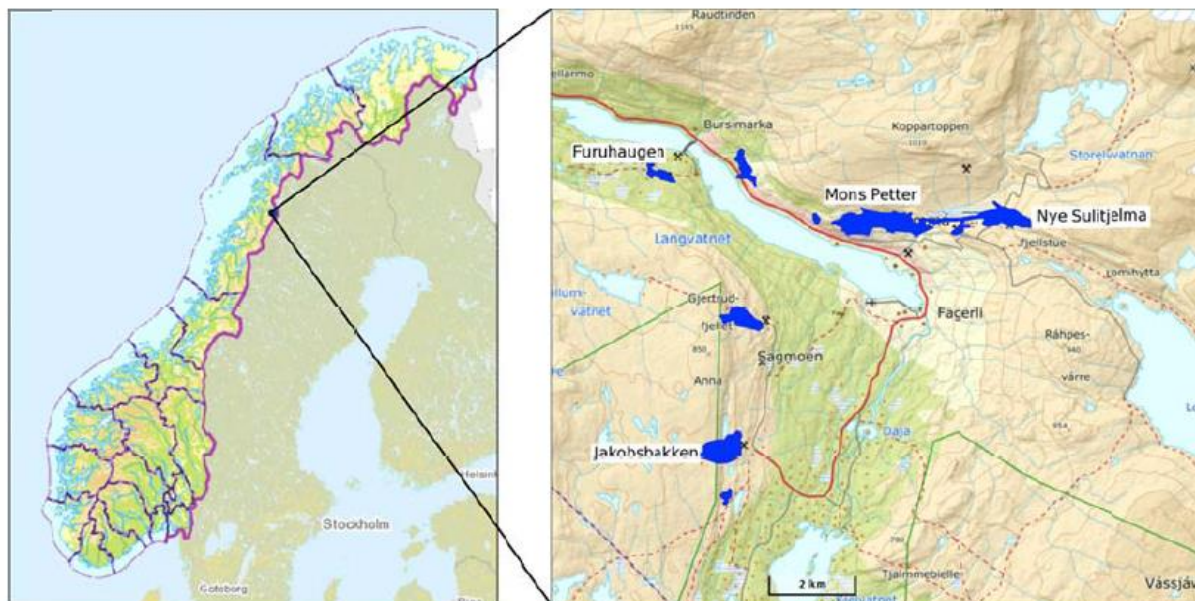


Figura 5-13. Ubicación de la zona de estudio [93]

5.3.2 Adquisición de datos

Se tomó una imagen captada por el satélite Worldview-3 el 22 de julio 2017, la cual fue aportada por la ESA [93]. Las características técnicas del sensor fueron recogidas en el apartado 3.6.1 (Tablas 3-1 y 3-2).

Cabe señalar que las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) son adecuadas para discriminar la respuesta espectral de minerales.

Adicionalmente, se tomaron muestras de campo de residuos mineros, vegetación y suelos en zonas contaminadas, así como muestras de vegetación alpina libres de contaminación. La toma de muestras se llevó a cabo en el periodo del 28-31 de julio de 2017, a través de una cámara hiperespectral, con una resolución de 500-900 nm [93].

5.3.3 Metodología empleada

A continuación, se lista la secuencia de procesamiento al que fue sometida la imagen captada por el satélite [93].

En primer lugar, fue sometida a una calibración radiométrica, basada en la conversión de números digitales en medida de radiancia espectral.

Seguidamente, la radiancia espectral fue convertida en reflectancia espectral, corrigiendo el ángulo e irradiancia solar. Tras ello, fue aplicado un modelo de corrección atmosférica.

Finalmente, se crearon máscaras aisladas para la vegetación, nieve, nubes y agua, las cuales fueron combinadas adecuadamente en una máscara final.

5.3.4 Resultados obtenidos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras el procesamiento de las imágenes obtenidas por el satélite Worldview-3.

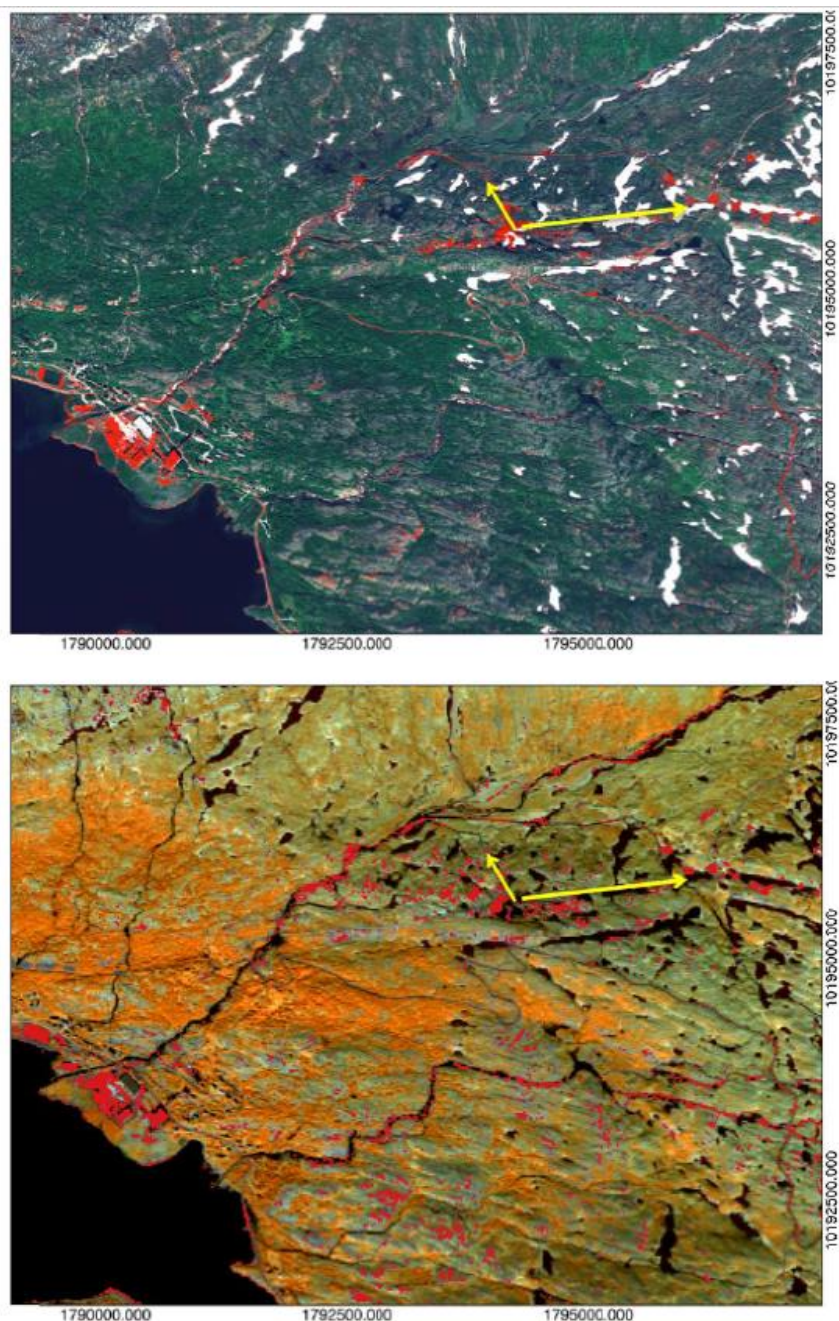


Figura 5-14. Imagen de la zona de estudio captada por el satélite Worldview-3: banda VNIR (arriba); banda SWIR (abajo) [93].

La imagen muestra el área comprendida entre Sulitjelma, anexa al lago Langvatnet, y las minas situadas en Nye Sulitjelma, en las montañas ubicadas al norte.

En ella se distingue, de color rojizo, la planta de proceso situada abajo a la izquierda, la carretera que va hacia la zona de las minas, así como alguna de las áreas donde existe acumulación de residuos mineros (arriba a la derecha).

Adicionalmente, en la imagen inferior los colores azulados se corresponden con rocas desnudas y vegetación.

5.3.5 Conclusiones

Las principales conclusiones a las que se llegó, por medio del estudio realizado, fueron las siguientes [93]:

- Los resultados obtenidos muestran que la combinación de una serie de bandas espectrales puede dar una visión general de aquellas áreas donde se encuentran los residuos mineros, con presencia de precipitación de minerales dando lugar a Drenaje Ácido de Mina.
- Los buenos resultados que ofrece la banda espectral VNIR para la detección de zonas contaminadas por AMD, sugieren la posibilidad de usar los datos aportados por el satélite gratuito Sentinel-2, cuya resolución espectral es similar al satélite Worldview-3. No obstante, en caso de tratarse de espacios mineros de menor tamaño, es preciso utilizar sensores hiperespectrales aerotransportados.
- Para obtener una mayor precisión y detalle de las zonas estudiadas, sería necesario disponer de librerías espectrales de referencia, así como tomar medidas de espectros de campo y realizar análisis de laboratorio.
- Esta aplicación puede ser trasladada a otros ámbitos de estudio tales como detectar problemas en la vegetación, realizar mapas de biomasa de la zona o estudiar los índices de biodiversidad.

5.4 Monitorización del Drenaje Ácido de Mina utilizando imágenes hiperespectrales captadas por un sensor a bordo de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) en el distrito de Sokolov (República Checa)

La investigación y desarrollo de sistemas de monitorización aplicadas a minas activas y abandonadas haciendo uso de técnicas de Teledetección ha sido ampliamente estudiado, principalmente haciendo uso de imágenes multispectrales e hiperespectrales. Dichos estudios se han llevado a cabo aprovechando las distintas características de absorción (en las regiones VNIR y SWIR del espectro electromagnético), que presentan los minerales secundarios formados a partir del proceso de oxidación de piritas. No obstante, dichas técnicas poseen una serie de inconvenientes tales como la falta de resolución espacial para captar pequeñas áreas, o que se trata de sistemas poco flexibles, costosos y que requieren mucho tiempo. Con objeto de contrarrestar solventar dichos problemas, se plantea dar un enfoque más económico y flexivo, utilizando técnicas no invasivas.

En ese sentido, se ha seleccionado un estudio llevado a cabo por Jackisch, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., Möckel, R. y Gloaguen, R., en la región de Sokolov (República Checa), caracterizada por su vinculación a la actividad minera, debido a los yacimientos de lignito que circundan la zona [94]. Dicha contribución pretende explorar el potencial de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) para monitorizar las áreas afectadas por Drenaje Ácido de Mina.

En la actualidad, la cartografía llevada a cabo mediante sensores a bordo de drones ha sido ampliamente utilizada en campos como la agricultura. No obstante, su uso para la monitorización del suelo y, particularmente, para la detección de minerales secundarios producto de la oxidación de piritas, supone todo un reto, dado que se encuentra aún en una fase de desarrollo e investigación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pretende aprovechar las ventajas que ofrecen los VANT, con respecto a las técnicas de Teledetección tradicionales, para ser utilizados como herramienta para la monitorización medioambiental de la contaminación ocasionada por AMD.

Por su parte, el alcance principal de dicha contribución se basa en tomar como referencia cuatro minerales comunes en el proceso de formación de AMD, a partir de los cuales se estime el pH, acidez y residuos mineros existentes en la zona de estudio.

Adicionalmente a lo anterior, con el apoyo de técnicas de fotogrametría, muestras de campo, validación en laboratorio, y tras llevar a cabo las correspondientes correcciones (radiométrica, geométrica y topográfica), se obtiene un mapa de elevadas resoluciones temporales y espaciales, que recoge la aproximación de la evolución de la contaminación por AMD.

5.4.1 Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio seleccionada es el lago Litov, perteneciente al distrito minero de Sokolov, en la República Checa. Se trata de una zona caracterizada por la intensa actividad minera (subterránea y a cielo abierto) que se viene produciendo desde el siglo XVII, destacando los yacimientos de carbón de Josef, Anezka u Antonin, con elevado contenido en sulfuros [94].

Así, la apariencia del paisaje ha cambiado por completo, a pesar de que pocas minas se encuentran activas en la actualidad, destacando la zona de escombreras y residuos mineros de Litov, principalmente ocasionados por la minería a cielo abierto, registrándose en ella los menores valores de pH de todo el sitio minero.

La ubicación de la zona de estudio seleccionada sobre la que se han realizado los vuelos se presenta a continuación en la Figura 5-15.



Figura 5-15. Localización de la zona de estudio en el distrito de Sokolov [94].

5.4.2 Adquisición de datos

En primer lugar, se tomaron imágenes a través una cámara hiperespectral (Rikola), con una resolución espectral de 504-900 nm. Estas imágenes tuvieron que ser sometidas a un preprocesado, el cual consiste en una georreferenciación automática de la imagen, una corrección atmosférica, y una conversión de la radiancia en reflectancia para poder ser interpretadas posteriormente [94].

Asimismo, la cámara tuvo que ser calibrada, para lo cual se utilizaron paneles de PVC de colores, blanco, gris y negro.

En total se seleccionaron 160 puntos de muestreo durante las cuatro campañas realizadas. Por su parte, se tomaron muestras de espectros de campo con un espectrómetro (350-2500 nm) y muestras de minerales en todas las anteriormente citadas localizaciones de muestreo. Asimismo, se tomaron muestras in situ del pH en los puntos de muestreo seleccionados.

Se utilizaron dos VANT especializados en la obtención de las imágenes hiperespectrales para las cuatro campañas realizadas. Los vuelos fueron automatizados mediante conexión GPS, mientras que los respectivos

aterrizajes fueron realizados por control remoto, asegurando así la protección de la cámara hiperespectral situada a bordo [94].

Posteriormente se llevaron a cabo ensayos de las muestras con la cámara utilizada en condiciones de laboratorio. El procesamiento al que fueron sometidas las imágenes fue el mismo que para las tomadas desde el dron [94].

Para la clasificación de las imágenes captadas, por un lado, se identificaron de las características espectrales de las muestras tomadas se utilizó como indicador el ratio de banda, mediante el cual se detecta la división de las diferentes bandas, dando una indicación de la absorción o reflexión. Por otro, se aplicaron los correspondientes filtros para obtener la máscara de la vegetación [94].

Finalmente, para la evaluación mineralógica de las muestras de campo se llevó a cabo una caracterización mediante fluorescencia de rayos X [94].

5.4.3 Metodología empleada

Una vez llevada a cabo la adquisición de datos y el procesamiento anteriormente citado, se lleva a cabo una librería con los espectros objetivo que conforman el área de estudio. Estos espectros son los finalmente seleccionados como “miembros finales”, de acuerdo al siguiente procedimiento [94].

1. Se seleccionan aquellas muestras identificadas en las imágenes hiperespectrales con valores de pH comprendidos entre 2 y 5.
2. Las muestras representan las características espectrales de la superficie.
3. Se aplican a las muestras las técnicas de difracción de rayos X (XRD) y de fluorescencia de rayos X (XRF), obteniéndose las respuestas espectrales correspondientes.
4. Se escanean las muestras en laboratorio con la cámara Rikola (la misma que se sitúa a bordo del dron).
5. Se extraen las características espectrales de las muestras mediante clasificaciones no supervisadas.
6. Se crean la biblioteca espectral de los “miembros finales” con todas las muestras.

5.4.4 Resultados obtenidos

En primer lugar, se obtuvo una caracterización de pH de la zona a partir de las muestras tomadas a lo largo de las campañas.

A partir de los análisis geoquímicos y mineralógicos realizados a las muestras de campo se obtuvo la composición mineral de la región.

Por su parte, a partir de la combinación de los espectros de campo analizados, así como los detectados por la cámara a bordo del VANT se hizo una selección de los miembros finales. En ese sentido, a continuación, se muestran un ejemplo de la respuesta espectral de diferentes parámetros obtenidos a partir de las campañas realizadas: mediante los análisis de campo (Figura 5-16. A y B) y mediante las imágenes captadas por la cámara hiperespectral a bordo del dron (Figura 5-16. D), y en el laboratorio (Figura 5-16. C).

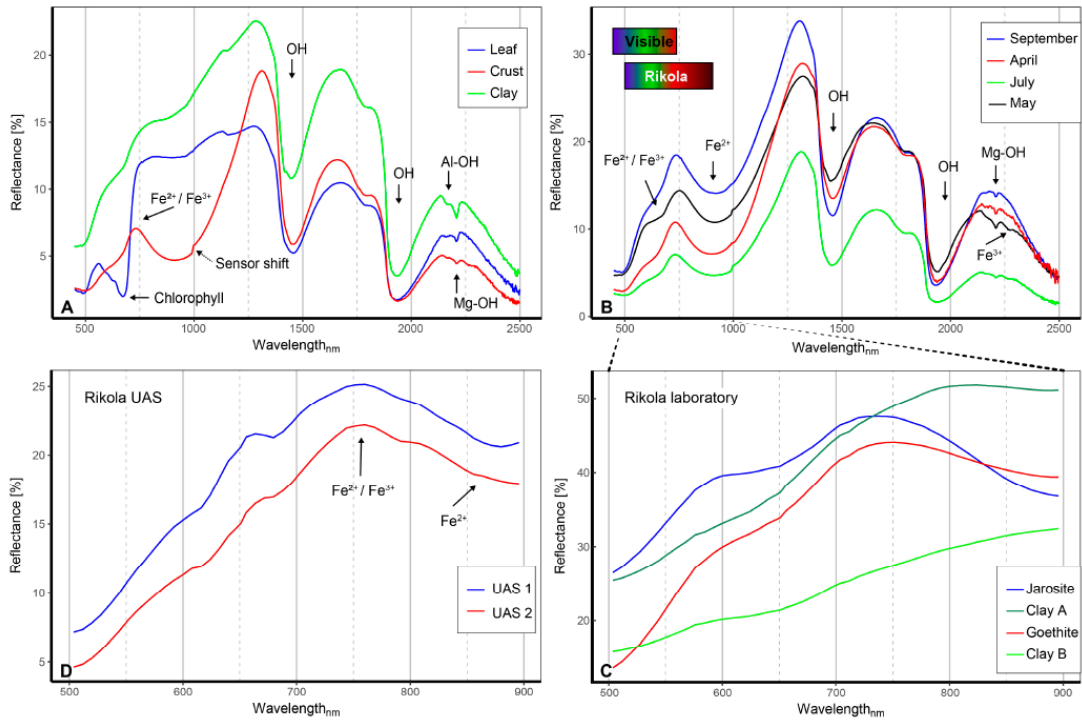


Figura 5-16. Respuesta espectral de diferentes elementos seleccionados durante las campañas realizadas sobre Litov. (a)(b) espectros de campo obtenidos mediante espectroradiómetro de campo; (c) (d) respuesta espectral adquirida con cámara hiperespectral a bordo de VANT y en condiciones de laboratorio [94].

Una vez llevado a cabo el procesamiento de la imagen, así como las técnicas de clasificación de imágenes espectrales (SAM y ratios de banda) para la obtención de los “miembros finales”, se presenta una distribución de los minerales que ocasionan Drenaje Ácido de Mina en la zona de Litov, a través de una imagen hiperespectral de alta resolución.

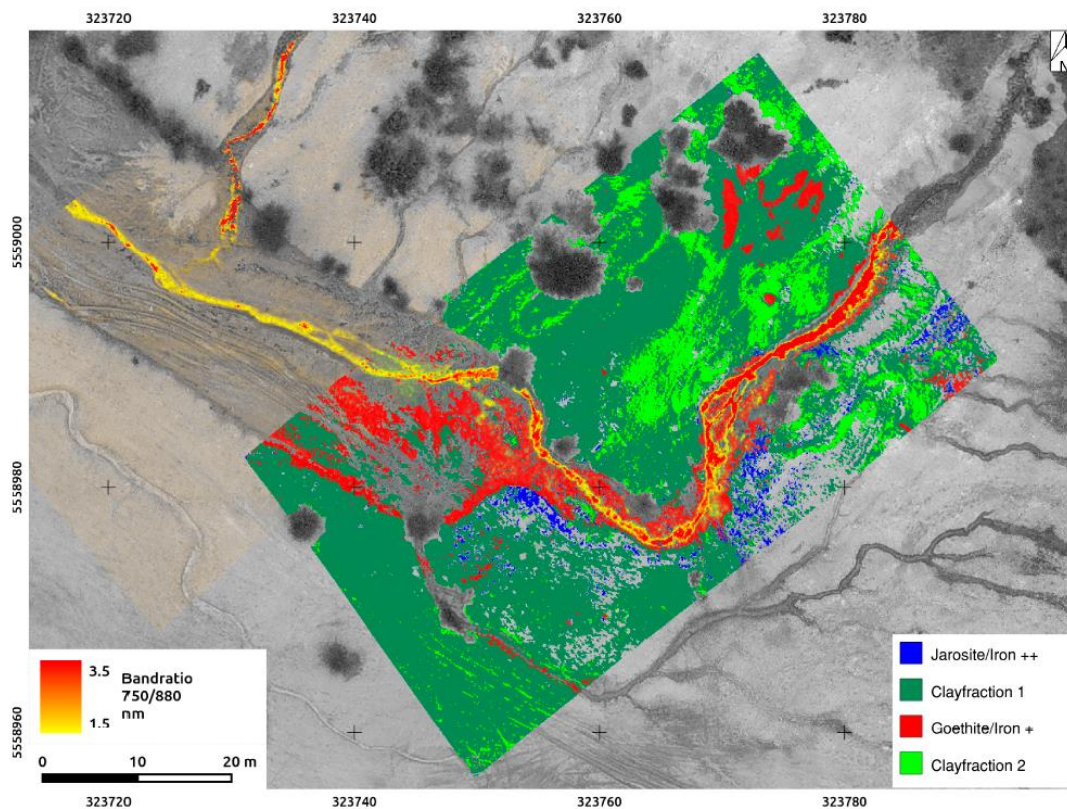


Figura 5-17. Mapa de distribución de minerales de AMD a lo largo de varios meses aplicando una combinación de diferentes técnicas de clasificación de imágenes hiperespectrales [94].

En la imagen puede observarse la cuenca de drenaje de Litov de color amarillo, así como los “miembros finales” correspondientes a los cuatro tipos de minerales que se distribuyen a lo largo de dicha cuenca. La alta resolución (5 cm) permite detectar detalles tales como los minerales ferrosos (color rojo) bordeando la corriente principal.

5.4.5 Conclusiones

A continuación, se resumen las conclusiones principales a las que se llegó a raíz de llevar a cabo las campañas de monitorización [94].

- El estudio llevado a cabo sobre la región de Sokolov confirma la viabilidad de la detección de minerales generadores de Drenaje Ácido de Mina, así como su mapa de distribución basado en la clasificación y procesamiento de imágenes hiperespectrales captadas por sensores a bordo de VANT. Para ello se han combinado medidas hiperespectrales de campo con análisis en laboratorio, y se ha elaborado una librería espectral de los “miembros finales” para una validación de los minerales identificados. Ello ha posibilitado la distinción de elementos con una alta resolución, no pudiendo ser identificados de otra forma mediante técnicas de observación satelital ni mediante sensores aéreos vehiculados.
- Resulta indispensable llevar a cabo un preprocesamiento de las imágenes captadas para poder interpretarlas, creándose resultados reproducibles de alta resolución.
- Se ha demostrado que las operaciones llevadas a cabo por drones requieren menor tiempo e inversión, una vez afrontado los gastos de mantenimiento de equipo. Se trata por tanto de técnicas rápidas, no invasivas y relativamente baratas.

- Se ha demostrado la flexibilidad de las operaciones de Teledetección mediante VANT debido a que la planificación de las campañas es sustancialmente más corta que la de otras aplicaciones.
- La predicción del pH en la zona de estudio mediante datos aportados por sensores a bordo de drones es válida pero limitada, debido a una serie de diversos condicionantes.
- Las principales limitaciones a las que se enfrenta esta técnica de Teledetección se deben a la resistencia del equipo, a la capacidad de carga de trabajo, así como a la falta de regulaciones legales que le permitan operar libremente por cualquier área.
- El objeto de fondo del estudio es poner de manifiesto los beneficios en materia de monitorización medioambiental que poseen las técnicas de Teledetección mediante VANT. En este sentido, se persigue que dichas técnicas de obtención de imágenes hiperespectrales ocupen el vacío observacional existente entre la Teledetección por medio de sensores aerotransportados y los trabajos de campo.

6 CONCLUSIONES

En este Capítulo final del Proyecto se lleva a cabo una recopilación de las principales conclusiones extraídas a lo largo del trabajo realizado. A este respecto, conviene recordar que la motivación que lleva a la realización del mismo no es otra que la de analizar los condicionantes para el cumplimiento de la evaluación de impacto ambiental de actividades industriales. A partir de ahí, estudiar la posibilidad de implantar nuevas técnicas que refuercen los planes de monitorización convencionales, en el marco de un desarrollo sostenible, ayudando a conseguir los objetivos marcados por la normativa vigente en materia de gestión ambiental.

Para ello, debido al amplio grado de alcance que ostenta la evaluación ambiental en la industria, se ha optado por particularizar dicho estudio a un ámbito concreto de aplicación. En ese sentido, dada la complejidad que conlleva la problemática de la contaminación hídrica por a Drenajes ácidos de mina a nivel mundial, se ha optado por estudiar la posibilidad de incorporar técnicas emergentes de Teledetección para el control de la calidad de las aguas, como método complementario a los métodos convencionales, proponiendo un plan de monitorización alternativo a los actualmente implementados.

A continuación, se recoge un listado de las principales conclusiones obtenidas.

En lo que respecta a los métodos convencionales de monitorización de la calidad de las aguas, a pesar de arrojar resultados de alta precisión, presentan una serie de inconvenientes, los cuales suponen imposibilitan la implementación de programas efectivos de monitorización y gestión de la calidad de las aguas. En el caso de actividades mineras, estas limitaciones dan lugar a una serie de impactos medioambientales severos. Con lo cual, resulta inviable la predicción de las posibles medidas de mitigación a tomar, así como el estudio de la evolución de las mismas una vez implementadas, resultando todo ello en el incumplimiento normativo de los Programas de Vigilancia Ambiental y, por tanto, en la anulación de EIA y de la autorización ambiental pertinente. Los principales inconvenientes son los siguientes:

- Los parámetros indicadores de calidad de las aguas se determinan mediante muestreos in-situ en localizaciones puntuales a lo largo de la zona de estudio, y posteriormente se analizan en laboratorio. Se tratándose de técnicas intensas, costosas y cuya interpretación de datos consume mucho tiempo.
- El estudio e investigación de las variaciones espaciales y temporales para elaborar tendencias sobre la calidad de las aguas a escala global resulta prácticamente inviable, debido a que la recolección de datos en campo únicamente representa una estimación puntual (en tiempo y espacio) de los parámetros de calidad de las aguas a analizar.
- La monitorización, predicción y gestión de las masas de agua a gran escala puede resultar inaccesible debido a diversos factores tales como la situación topográfica de diversas zonas de estudio.
- Llevar a cabo una toma de muestras in-situ de forma exacta y precisa se ve limitada debido a los posibles errores en el muestreo de campo, así como en el análisis de muestras en laboratorio.

Por su parte, como consecuencia del estudio del potencial que poseen las técnicas de Teledetección como herramienta para la vigilancia y control de la calidad de las aguas, se ponen de manifiesto los siguientes aspectos positivos a destacar [95] [40]:

- Se ofrece una visión sinóptica de las masas de agua, lo cual permite llevar a cabo una monitorización más efectiva en lo que respecta a variaciones espaciales y temporales.
- Da lugar a una visión sincronizada de la calidad de las aguas para un grupo de zonas de estudio de una misma región, con lo cual se trata de una técnica versátil que permite realizar estudios a escala local, regional y global.
- Proporciona series históricas de parámetros de interés determinantes de la calidad de las aguas en una misma zona de estudio, permitiendo construir líneas de tendencia que faciliten la interpretación de los datos por parte de usuarios finales.
- Permite acceder a cualquier zona de estudio, incluso a aquellas de difícil acceso debido a los obstáculos que pueda presentar la topografía del terreno.

A pesar de lo anterior, las técnicas de Teledetección poseen una serie de restricciones, las cuales se han abordado a partir de una selección de aplicaciones concretas de la Teledetección para la vigilancia y control de la calidad de aguas contaminadas por AMD.

A continuación, se recogen las principales restricciones que se han tomado como punto de partida, así como las conclusiones extraídas a raíz de los casos de estudio procedentes de una revisión bibliográfica.

1. La existencia de ciertas complejidades inherentes a las aguas continentales y costeras que dificultan la detección directa de determinados parámetros de calidad

A pesar de la existencia de una gran cantidad de estudios centrados en las variables ópticas de determinados parámetros que son fácilmente captables por sensores de Teledetección, aún no se ha profundizado en otros parámetros fundamentales para la estimación de la calidad de las aguas, debido a que presentan características ópticas débiles, así como una baja relación de la señal de ruido.

No obstante lo anterior, en muchos casos pueden ser determinados indirectamente a través de otra medida. En ese sentido, se han seleccionado casos de estudio que determinan el pH de las aguas contaminadas por drenaje ácido de mina a través de la elaboración mapas representativos de los minerales secundarios producto de la meteorización de pirritas. Para ello, aplican un procedimiento secuencial al de tratamiento de imágenes, que consigue aislar digitalmente las zonas de interés (discriminando las zonas cubiertas por vegetación, u otros usos del suelo que entorpezcan la interpretación).

En cualquier caso, cartografiar las aguas ácidas procedentes de residuos mineros que contaminan un río requiere un entendimiento completo del sistema (sedimentos, parámetros geomorfológicos, presencia de vegetación, climatología del entorno).

2. La falta de bibliografía contrastada para la obtención de las firmas espectrales de determinados parámetros indicadores

En los todos los casos de estudio analizados queda patente la importancia de usar una espectroteca local de la zona de estudio, es decir, que refleje los elementos particulares de dicha zona, así como su respuesta espectral para unas determinadas condiciones. Así, podrán ser comparables las variables espaciales y temporales, con respecto a los datos de referencia disponibles, esto es, las librerías espectrales de referencia, así como las medidas tomadas en campo y analizadas en laboratorio.

3. Las interferencias atmosféricas generan restricciones en las señales ópticas procedentes de las masas de agua

A raíz de los casos de estudio analizados, se han de tener en cuenta las desviaciones en la extracción de datos debidas a correcciones atmosféricas y errores en el procesamiento de las imágenes. Esto supone una de los principales retos a los que se enfrenta esta técnica emergente.

4. Los modelos desarrollados a partir de los datos obtenidos requieren llevar a cabo una correcta calibración y validación utilizando medidas in-situ, todo ello en ausencia de cobertura de nube

En todos los estudios seleccionados un factor determinante a la hora de lograr obtener unos datos suficientemente fiables es la calibración de los sensores utilizados, para lo cual son necesarias medidas de campo.

Asimismo, los datos obtenidos forman parte de una metodología que, para obtener datos concluyentes, requiere de la validación de los mismos por medio de medidas in situ.

En resumidas cuentas, las técnicas de Teledetección requieren de herramientas adicionales de análisis para obtener datos concluyentes. Por tanto, no es una herramienta que por sí sola pueda suplir toda la información requerida por los actuales planes de monitorización de la calidad de las aguas.

5. Las limitaciones en lo que respecta a resolución espacial, espectral y temporal de los distintos sensores actualmente utilizados

Como se ha visto anteriormente, dependiendo de la zona de estudio, el grado de detalle de los elementos a captar por parte de los sensores o la serie temporal requerida para llevar a cabo dicho estudio, son factores determinantes a tener en cuenta a la hora de adquirir un determinado sensor.

En ese sentido, la evolución de la tecnología en materia de Teledetección se encuentra en un proceso de mejora constante, de modo que cada vez son más los sensores que salen al mercado (fruto de proyectos de investigación públicos, así como comerciales) sustituyendo a sus antecesores, y mejorando sus prestaciones.

6. El coste que conlleva la adquisición de datos mediante sensores hiperespectrales

A pesar de la existencia de sensores satelitales gratuitos, el coste de adquisición de datos mediante sensores hiperespectrales de alta resolución, sobre todo en caso de ser aerotransportados, así como la adquisición de equipos hiperespectrales para realizar las medidas de campo, suponen uno de los mayores factores determinantes para la implementación de este tipo de tecnología.

Adicionalmente, el hecho de que las técnicas de monitorización necesiten apoyarse en los métodos convencionales de campo, supone una barrera económica, debido al coste adicional que ello genera.

A este respecto, señalar que se están desarrollando operaciones llevadas a cabo por Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), los cuales requieren menor tiempo e inversión, una vez afrontado los gastos de mantenimiento de equipo. Se trata por tanto de técnicas rápidas, flexibles, no invasivas y relativamente baratas. No obstante, estas técnicas se encuentran aún en fase de investigación, mediante las cuales se pretende de ocupar el vacío observacional existente entre la Teledetección por medio de sensores aerotransportados y los trabajos de campo.

En resumen, se puede afirmar que las técnicas de Teledetección poseen un elevado potencial que puede ser aprovechado como herramienta complementaria a las actuales tecnologías recogidas por la normativa actual para determinar la calidad de las aguas continentales y oceánicas en general, y de aquellas contaminadas por Drenaje Ácido de Mina, en particular. No obstante, existen una serie de desafíos que están aún por resolver.

En primer lugar, a pesar de los recientes avances llevados a cabo en esta materia, todas las investigaciones en materia de Teledetección consultadas en el presente Proyecto coinciden en la falta de un marco de referencia procedimental que integre dichas técnicas a la metodología convencional. Adicionalmente, aunque existe bibliografía extensa acerca de aproximaciones analíticas desarrolladas, debido a la complejidad teórica y de cálculo que estas presentan, aún se siguen empleando en su lugar modelos empíricos y semi empíricos.

Otro asunto que requiere de gran esfuerzo es el de transformar los datos que proporcionan los sensores en información y aplicaciones que sean operativas para los usuarios finales. En ese sentido, el informe *Transforming Remote Sensing Data into Information and Applications* [96] así como otra bibliografía consultada [97] [95], identifica alguno de los problemas que hay que abordar.

- Los usuarios finales (gestores ambientales) requieren información específica para resolver problemas concretos. De este modo, debe cubrirse la diferencia existente entre los datos brutos captados por los sensores y la información que llega al usuario final, por medio de aplicaciones operativas que la transformen y faciliten su interpretación.
- La falta de comunicación entre investigadores y potenciales usuarios finales debe ser solventada. Este hecho es de gran importancia, puesto que dichos expertos deben comprender las necesidades concretas para poder dar respuesta a las mismas, además de transmitir la utilidad de los productos que van a suministrar para tal cometido.
- La financiación del proceso de transformar los datos brutos en aplicaciones concretas para la gestión de dicha información, debe ser reconocida y abordada por los usuarios finales, en tanto en cuanto, la adquisición de imágenes es únicamente el primer paso del proceso hasta conseguir una aplicación operativa que proporcione los datos deseados.

Por su parte, el hecho de que suponga una medida complementaria que refuerce y mejore los actuales procedimientos empleados en la vigilancia y control de la calidad de las aguas es a costa de un coste adicional sobre el coste total del plan de monitorización. Para ello, es importante que los organismos correspondientes inviertan en la investigación y desarrollo de nueva tecnología de calidad a un coste inferior.

Para finalizar, el hecho más importante a destacar es que se trata de una tecnología interdisciplinar, en la cual intervienen numerosas áreas de conocimiento diferentes entre sí, pudiendo contribuir considerablemente en la mejora de la gestión ambiental y de la calidad de las aguas. No obstante, para poder aprovechar el potencial de aplicación de dicha tecnología, es imprescindible establecer un diálogo abierto y efectivo entre la comunidad científica, responsables políticos, gestores ambientales y demás partes interesadas a nivel local, estatal y comunitario.

REFERENCIAS

- [1] A. Pastor Aberturas, La evaluación de impacto ambiental: Estudio preliminar de Evaluación de Impacto Ambiental, Oviedo: Trabajo Fin de Máster. Escuela de ingeniería de minas, energía y materiales. Universidad de Oviedo, 2017.
- [2] J. Herrera, La protección medioambiental en Minería y Desarrollo Sostenible, Madrid: Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [3] C. M. Díaz Barrado, «Los objetivos de desarrollo sostenible: un principio de naturaleza incierta y varias dimensiones fragmentadas,» *Anuario español de derecho internacional*, vol. 32, pp. 9-42, 2016.
- [4] Á. J. Rodrigo, El desafío del desarrollo sostenible. Los principios del derecho internacional relativos al desarrollo sostenible, Madrid, Barcelona, Buenos Aires, Sao Paulo : Fundación Privada. Centro de Estudios Internacionales Marcial Pons, 2015.
- [5] E. M. Romero González, «Evaluación ambiental: cuestiones generales,» de *Evaluación y Gestión medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 92-111.
- [6] Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente, «Diario Oficial de las Comunidades Europeas,» 7 junio 2001. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2001/197/L00030-00037.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [7] Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente., «Documento Oficial de la Unión Europea,» 13 diciembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2012/026/L00001-00021.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [8] Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de abril de 2014, por la que se modifica la Directiva 2011/92/UE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente., «Diario Oficial de la Unión Europea,» 16 abril 2014. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2014/124/L00001-00018.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [9] Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, «Boletín Oficial del Estado,» 9 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [10] Ley 9/2018, de 5 de diciembre, por la que se modifica la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, la Ley 21/2015, de 20 de julio, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes y la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la q, «Boletín Oficial del Estado,» 5 diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2018/12/06/pdfs/BOE-A-2018-16674.pdf>. [Último acceso: 2019].

- [11] E. M. Romero González, «5.1 Introducción general,» de *Evaluación y Gestión medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 77-90.
- [12] E. M. Romero González, «5.4 Evaluación de impacto Ambiental de Proyectos,» de *Evaluación y Gestión medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 128-151.
- [13] Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación, «Diario Oficial de Comunidades Europeas,» 24 septiembre 1996. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/1996/257/L00026-00040.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [14] Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (Versión codificada), «Diario Oficial de la Unión Europea,» 15 enero 2008. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2008/024/L00008-00029.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [15] E. M. Romero González, «6.1 Introducción y cuestiones generales,» de *Evaluación y Gestión Medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 253-260.
- [16] Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), «Diario Oficial de la Unión Europea,» 24 noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2010/334/L00017-00119.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [17] Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación., «Boletín Oficial del Estado,» 1 julio 2002. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2002/07/02/pdfs/A23910-23927.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [18] Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, «Boletín Oficial del Estado,» 11 junio 2013. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/06/12/pdfs/BOE-A-2013-6270.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [19] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, «Boletín Oficial del Estado,» 28 julio 2011. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [20] Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación., «Boletín Oficial del Estado,» 16 diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2016/12/31/pdfs/BOE-A-2016-12601.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [21] E. M. Romero González, «6.2 La Autorización Ambiental Integrada (AAI),» de *Evaluación y Gestión Medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 263-300.
- [22] E. M. Romero González, Apuntes de la Asignatura de Gestión Ambiental en la Industria del Máster en Ingeniería Química, Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2018-2019.
- [23] Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la calidad Ambiental, «Boletín Oficial de la Junta de Andalucía,» 9 julio 2007. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007->

- 15158-consolidado.pdf. [Último acceso: 2019].
- [24] Decreto 356/2010, de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada, se establece el régimen de organización y funcionamiento del registro de autorizaciones de actuaciones sometidas a los instrumentos de prevención y control ambiental, «Boletín Oficial de la Junta de Andalucía,» 3 agosto 2010. [En línea]. Available: http://noticias.juridicas.com/base_datos/CCAA/an-d356-2010.html. [Último acceso: 2019].
- [25] Confederación de Empresarios de Andalucía, «Autorización Ambiental Unificada. Manual Práctico,» 2011. [En línea]. Available: https://www.cea.es/portal/novedades/2011/Herramienta_AAU/adjuntos/MANUAL%20AAU.pdf. [Último acceso: 2019].
- [26] E. M. Romero González, «6.3 Algunas cuestiones relativas al alcance de la AAI,» de *Evaluación y Gestión medioambiental para Planes, Programas y Proyectos de Ingeniería*, Sevilla, Editorial Universidad de Sevilla, 2015, pp. 300-322.
- [27] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas., «Diario Oficial de las Comunidades Europeas,» 22 diciembre 2000. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2000/327/L00001-00073.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [28] Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental., «Boletín Oficial del Estado,» 11 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/09/12/pdfs/BOE-A-2015-9806.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [29] Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social., «Boletín Oficial del Estado,» 30 diciembre 2003. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-23936-consolidado.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [30] Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas., «Boletín Oficial del Estado,» 20 julio 2001. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2001/BOE-A-2001-14276-consolidado.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [31] Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas., «Boletín Oficial del Estado,» 11 abril 1986. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1986/BOE-A-1986-10638-consolidado.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [32] Ministerio para la Transición Ecológica, «Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR),» Gobierno de España , [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/noticias/emisiones-agua-demarcaciones-hidrograficas-667122008.html>. [Último acceso: 2019].
- [33] MITECO, «Autorización de vertido. Vertidos de aguas residuales,» MITECO. Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/vertidos-de-aguas-residuales/autorizacion-vertido/>. [Último acceso: 2019].
- [34] E. Blasco, «Actualidad Jurídica Ambiental,» Centro Internacional de Estudios de Derecho Ambiental (CIEDA-CIEMAT), [En línea]. Available: http://www.actualidadjuridicaambiental.com/_espana-aguas-contaminacion/. [Último acceso: 2019].
- [35] MITECO, «Programas de seguimiento de las aguas superficiales,» Ministerio para la Transición

- Ecológica. Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/programas-seguimiento/default.aspx>. [Último acceso: 2019].
- [36] Ministerio para la Transición Ecológica, «GeoPortal del Ministerio para la Transición Ecológica,» [En línea]. Available: <https://sig.mapama.gob.es/geoportal/>.
- [37] MITECO, «Control y vigilancia de las aguas continentales,» 2004. [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-ambientales/3_2_3_2004_tcm30-127249.pdf. [Último acceso: 2019].
- [38] H. Segnem y N. Demirel, *Remote Sensing of the Mine Environment*, Ankara: CRC Press, 2011.
- [39] Initiative for Responsible Mining Assurance, «Environmental Responsibility Requirements,» de *IRMA Standard for responsible mining*, 2016, pp. 150-248.
- [40] M. Haji, A. M. Melesse y R. Lakshmi, «A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques,» *Sensors*, n° 16, pp. 1-43, 2016.
- [41] M. Olías, «La contaminación minera de los ríos Tinto y Odiel. Apéndice al Plan Hidrológico del Distrito Tinto-Odiel-Piedras,» Agencia Andaluza del Agua, Sevilla, 2010.
- [42] M. Risco, «Testing historical Landsat records for monitoring the effects of Acid Mine Drainage in the Huelva Estuary,» M.Sc. in Geographic Information Systems. Faculty of social and human science, geography and environment. University of Southampton, Sevilla, 2018.
- [43] F. Akbal y S. Koldas, «Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies,» *Journal of Cleaner Production*, Vols. %1 de %212-13, n° 14, pp. 1139-1145, 2006.
- [44] R. Warner, «Distribution of Biota in a Stream Polluted by Acid Mine DRainage,» *Ohio Journal of Science*, vol. 4, n° 71, pp. 202-215, 1971.
- [45] N. Gray, «Acid Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem,» *Environmental Geology*, Vols. %1 de %21-2, n° 30, pp. 62-71, 1996.
- [46] A. Aguilera, «Eukaryotic Community Distribution and Its Relationship to Water Physicochemical Parameters in a Extreme Acidic Environment, Río tinto (Southwestern Spain),» *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 8, n° 72, pp. 5325-5330, 2006.
- [47] M. Kalin, «Response of phytoplankton to ecological engineering remediation of a Canadian Shield Lake affected by acid mine drainage,» *Ecological Engineering*, vol. 3, n° 28, pp. 296-310, 2006.
- [48] G. Ochieng, «Impacts of mining on water resources in South Africa: A review,» *Scientific Research and Essays*, vol. 5, n° 22, pp. 3351-3357, 2010.
- [49] N. Smucker, «Roles of benthic algae in the structure, function, and assessment of stream ecosystem affected by acid mine drainage,» *Journal of Phycology*, vol. 3, n° 50, pp. 425-436, 2014.
- [50] C. Johnson y I. Thornton, «Hydrological and chemical factors controlling the concentrations of Fe, Cu, Zn and As in a river system contaminated by Acid Mine Drainage,» *Water Research*, vol. 3, n° 21, pp. 359-365, 1987.
- [51] A. Hierro, «Geochemical behavior of metals and metalloids in a estuary affected by acid mine drainage

- (AMD),» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 4, n° 21, pp. 2611-2627, 2014.
- [52] C. Levings, «Effect of on acid mine drainage effluent on phytoplankton biomass and primary production at Britannia Beach, Howe Sound, British Columbia,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 12, n° 50, pp. 1585-1594, 2005.
- [53] M. Ramirez, «Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 1, n° 50, pp. 62-72, 2005.
- [54] J. Cloern, «Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystem,» *Biogeosciences*, n° 11, pp. 2477-2501, 2014.
- [55] M. Orte de, «Metal mobility and toxicity to microalgae associated with acidification of sediments: CO₂ and acid comparison,» *Marine Environmental Research*, n° 93, pp. 139-144, 2014.
- [56] S. Saalim, «Benthic foraminiferal response to changes in mining pattern. a case study from the Zuari estuary, Goa, India,» *Environmental Earth Science*, vol. 20, n° 76, p. 706, 2017.
- [57] J. Nieto, «Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 1. Hydrochemical characteristics and pollutant load of the Tinot and Odiel rivers,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 11, n° 20, pp. 7509-7519, 2013.
- [58] H. Tutu, «The chemical characteristics of Acid Mine Drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa as a case study,» *Applied Geochemistry*, vol. 12, n° 23, pp. 3666-3684, 2008.
- [59] K. Naicker, «Acid mine drainage arising from cold mining activity in Johannesburg, South Africa and environs,» *Environmental Pollution*, vol. 1, n° 122, pp. 29-40, 2003.
- [60] K. McDonald, «Impact of ARTisanal Small-Scale Gold Mining on Water Quality of a Tropical River (Surow River, Ghana),» de *10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual conference*, Santiago de Chile, 2015.
- [61] H. Dankwa, «Impact of Mining Operations on the Ecology of River Offin in Ghana,» *West African Journal of Applied Ecology*, vol. 1, n° 7, pp. 19-30, 2005.
- [62] A. Smolders, «Effects of Mining Activities on Heavy Metal Concentrations in water, sediments, and macroinvertebrates in different reaches of the Pilcomayo river, South America,» *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 3, n° 44, pp. 314-323, 2003.
- [63] L. Lobo, «Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the past 40 years and relationship with water siltation,» *Remote sensing*, vol. 7, n° 8, p. 579, 2016.
- [64] B. A y M. Williams, «Water and mining conflicts in Peru,» *Mountain Research and Development*, Vols. 1 de 2, n° 28, pp. 190-195, 2008.
- [65] S. Matsumoto, «The key factor of Acid Mine Drainage (AMD) in the History of the contribution of mining industry to the prosperity of the United States and South Africa: A review,» *Natural Resources*, vol. 7, n° 7, pp. 445-460, 2016.
- [66] M. Olías, «Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers (South West Spain),» *Applied Geochemistry*, vol. 10, n° 21, pp. 1733-1749, 2006.

- [67] C. Cánovas, «Hydrogeochemical characteristics of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain). Factor controlling metal contents,» *Science of the Total Environment*, vol. 1, n° 373, pp. 363-382, 2007.
- [68] C. Braungardt, «Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain,» *Applied Geochemistry*, vol. 11, n° 18, pp. 1757-1771, 2003.
- [69] M. Yang, «Integration of Water Quality Modelling Remote Sensing and GIS,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 2, n° 35, pp. 253-263, 1999.
- [70] I. Yeo, «Improved Understanding of Suspended Sediment Transport Process Using Multi-Temporal Landsat Data: A case Study From the Old woman Creek Estuary (Ohio),» *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 2, n° 7, pp. 636-647, 2014.
- [71] N. Usali y M. Ismail, «Use of Remote Sensing and GIS in Monitoring Water Quality,» *Journal of Sustainable Development*, vol. 3, n° 3, pp. 228-238, 2010.
- [72] L. Tian, «Assessment of Total Suspended Sediment Distribution Under varying Tidal Conditions in Deep Bay: Initial Results from HJ-1A/1B Satellite CCD Images,» *Remote Sensing*, vol. 10, n° 6, pp. 9911-9929, 2014.
- [73] M. Kumar y T. Singh, «Environmental Monitoring and Assessment Remote Sensing Approach,» Department of Earth Sciences Indian Institute of Technology, Bombay (India).
- [74] E. Chuvieco, *Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach*, Madrid: Taylor & Francis, 2016.
- [75] M. Más, *Uso de la Teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: aplicación al mar Menor*, Cartagena: ETS Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas (Universidad Politécnica de Cartagena), 2017.
- [76] World Meteorological Organization, «Global Observing System,» 2019. [En línea]. Available: https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/programme/featured_media/gos-fullsize.jpg?_2l0vXEzg3DJO0D980JblfHLVNGUJXS3.
- [77] C. Davids y L. Rouyet, «Remote Sensing for the Mine Industry,» Northern Research Institute, Tromsø, 2018.
- [78] R. Arenas, *Aplicación de la Teledetección en la exploración geominera y de recursos naturales*, Oviedo: Escuela de Ingenieros de Minas, Energía y Materiales, 2016.
- [79] T. Lillesand y R. Kiefer, *Remote sensing and image interpretation*, Nueva York: John Wiley and sons, 2000.
- [80] S. Martínez, *Mofometría de actividades extractivas a partir de imágenes de satélite de alta resolución espacial*, Manresa: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (Universidad Politécnica de Cataluña), 2016.
- [81] Group of Earth Observation, «Group On Earth Observation,» 2019. [En línea]. Available: https://www.earthobservations.org/g_faq.html.
- [82] Europe Space Agency, «Europe Space Agency,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico. [Último acceso: 2019].

- [83] Europe Space Agency, «Colour vision for Copernicus,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/02/Colour_vision_for_Copernicus. [Último acceso: 2019].
- [84] Europe Space Agency, [En línea]. Available: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-4_and_-5. [Último acceso: 2019].
- [85] D. Coulter, P. Hauff y W. Kerby, «Airborne Hyperspectral Remote Sensing,» *Advances in Airborne Geophysics*, n° 22, pp. 375-386, 2007.
- [86] N. Zabcica, B. Rivarda, C. Ong y A. Mueller, «Using airborne hyperspectral data to characterize the surface pH and mineralogy of pyrite mine tailings,» *International Journal of Applied Earth Observation and*, n° 32, pp. 152-162, 2014.
- [87] J. Buzzi, A. Riaza, E. García-Meléndez y S. Holzwarth, «Detección de cambios en los sedimentos de un río afectado por Drenaje Ácido de Mina mediante imágenes hiperespectrales (río Odiel, Huelva),» *Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, n° 16, pp. 1-5, 2013.
- [88] J. Buzzi, A. RIAZA, García-Meléndez, J. Carrera y S. Holzwarth, «Monitoring of river contamination derived from acid mine drainage,» *River research application*, n° 32, pp. 125-136, 2016.
- [89] A. Riaza, C. Ong, A. Müller y J. Moreira, «El seguimiento espacial hiperespectral de residuos mineros de piritas, un registro geológico de variabilidad climática,» *Ambientalia (Revista Interdisciplinar de las Ciencias ambientales)*, vol. 1, pp. 194-207, 2009-2010.
- [90] J. Plumlee, «The environmental geology of mineral deposits,» Denver, 1999.
- [91] A. Riaza, J. Buzzi, E. García-Meléndez, V. Carrere, A. Sarmiento y A. Müller, «River acid mine drainage sink by coastal tides: sediment and water mapping through,» *International Journal of Remote Sensing*, n° 33, pp. 6163-6185, 2012.
- [92] A. Riaza, J. Buzzi, E. García-Melendez, V. Carrere, A. Sarmiento y A. Muller, «Mapping acid water on an acid mine drainage contaminated river with hyperspectral Hymap data (River Odiel, Huelva, Spain),» de *4th Workshop on Remote Sensing and Geology*, Mykonos, 2012.
- [93] J. Buzzi, «Imaging spectroscopy to evaluate the contamination from sulphide mine waste in the berian Pyrite Belt using hyperspectral sensors (Huelva, Spain),» de *phD, Universidad de León*, León, 2012.
- [94] D. S. Yucel, M. Yucel y A. Baba, «Change detection and visualization of acid mine lakes using time series satellite image data in geographic information systems (GIS): Can (Canakkale) County, NW Turkey,» *Environmental Earth Science*, 2014.
- [95] C. Davids, «Mapping of abandoned mine tailings and acid mine drainage using in situ hyperspectral measurements and WorldView-3 satellite imagery,» Northern Research Insitute, Tromso, 2018.
- [96] R. Jackisch, S. Lorenz, R. Zimmermann, R. Möckel y R. Gloaguen, «Drone-Borne hyperspectral monitoring of Acid Mine Drainage: An example from the Sokolov Lignite District,» *Remote sensing*, vol. 10, n° 385, pp. 1-23, 2018.
- [97] R. P. Bukata, Satellite monitoring of inland and coastal water quality. Retrospection, Introspection, Future Direction, Ontario: Taylor & Francis Group, 2005.

- [98] National Research Council, «Transforming Remote Sensing Data into Information and Applications,» National Academy Press, Washington D.C, 2001.
- [99] E. Sánchez Rodríguez, Aplicación de la Teledetección espacial al estudio de la dinámica y calidad de las aguas litorales. Estudios mesomareales de la costa atlántica andaluza, Sevilla: Tesis doctoral. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla, 2015.
- [100] Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente, «Boletín Oficial del Estado,» 28 abril 2006. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2006/04/29/pdfs/A16820-16830.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [101] Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, «Boletín Oficial del Estado,» 11 enero 2008. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/01/26/pdfs/A04986-05000.pdf>. [Último acceso: 2019].

CONCEPTOS Y DEFINICIONES

«**Accidente grave**»: suceso, como una emisión, un incendio o una explosión de gran magnitud, que resulte de un proceso no controlado durante la ejecución, explotación, desmantelamiento o demolición de un proyecto, que suponga un peligro grave, ya sea inmediato o diferido, para las personas o el medio ambiente.

«**Administraciones Públicas afectadas**»: aquellas Administraciones Públicas que tienen competencias específicas en las siguientes materias: población, salud humana, biodiversidad, geodiversidad, fauna, flora, suelo, subsuelo, agua, aire, ruido, factores climáticos, paisaje, bienes materiales, patrimonio cultural, ordenación del territorio y urbanismo.

«**Aguas continentales**»: Todas las aguas en la superficie del suelo, y todas las aguas subterráneas situadas hacia tierra desde la línea que sirve de base para medir la anchura de las aguas territoriales

«**Aguas de transición**»: Masas de agua superficiales próximas a las desembocaduras de los ríos y que son parcialmente salinas como consecuencia de su proximidad a las aguas costeras, pero que reciben una notable influencia de flujos de agua dulce.

«**Aguas subterráneas**»: Todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.

«**Aguas superficiales continentales**»: Todas las aguas quietas o corrientes en la superficie de la tierra que no entran en las categorías de aguas costeras ni de aguas de transición. Incluyen ríos y lagos y las masas de agua artificiales o muy modificadas asimilables a estas categorías.

«**Autorización Ambiental Integrada**»: la resolución escrita del órgano competente de la comunidad autónoma en la que se ubique la instalación, por la que se permite, a los efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, explotar la totalidad o parte de una instalación, bajo determinadas condiciones destinadas a garantizar que la misma cumple el objeto y las disposiciones de esta ley. Tal autorización podrá ser válida para una o más instalaciones o partes de instalaciones que tengan la misma ubicación.

«**Autorización Ambiental Unificada**»: Resolución de la Consejería competente en materia de medio ambiente en la que se determina, a los efectos de protección del medio ambiente, la viabilidad de la ejecución y las condiciones en que deben realizarse las actuaciones sometidas a dicha autorización conforme a lo previsto en esta Ley 7/2007, de 9 de julio, de *Gestión Integrada de la Calidad Ambiental*, y lo indicado en su Anexo I. En la autorización ambiental unificada se integrarán todas las autorizaciones y pronunciamientos ambientales que correspondan a la Consejería competente en materia de medio ambiente y que sean necesarios con carácter previo a la implantación y puesta en marcha de las actuaciones.

«**Autorización sustantiva**»: La autorización de industrias o instalaciones industriales que estén legal o reglamentariamente sometidas a autorización administrativa previa. En particular, tendrán esta consideración las autorizaciones del Sector Eléctrico, del Sector de Hidrocarburos, e instalaciones químicas para la fabricación de explosivos.

«**Condición de referencia**»: Valor del indicador correspondiente a niveles de presión antropogénicas nulas o muy bajas.

«**Cuenca hidrográfica intercomunitaria**»: Cuenca hidrográfica cuya superficie se extiende por el territorio de más de una comunidad autónoma.

«**Cuenca hidrográfica intracomunitaria**»: Cuenca hidrográfica cuya superficie está comprendida íntegramente en el territorio de una Comunidad Autónoma.

«**Declaración de Impacto Ambiental**»: informe preceptivo y determinante del órgano ambiental con el que finaliza la evaluación de impacto ambiental ordinaria, que evalúa la integración de los aspectos ambientales en el proyecto y determina las condiciones que deben establecerse para la adecuada protección del medio ambiente

y de los recursos naturales durante la ejecución y la explotación y, en su caso, el cese, el desmantelamiento o demolición del proyecto.

«**Demarcación hidrográfica**»: Zona terrestre y marina compuesta por una o varias cuencas hidrográficas vecinas y las aguas de transición, subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas.

«**Elemento de calidad**»: Componente del ecosistema acuático cuya medida determina el estado de las aguas, se agrupan en elementos biológicos, hidromorfológicos, químicos y fisicoquímicos.

«**Estación de muestreo**»: Conjunto de puntos de muestreo utilizados para la evaluación del estado de una masa de agua.

«**Estado de las aguas superficiales**»: La expresión general del estado de una masa de agua superficial determinado por el peor valor de su estado ecológico y de su estado químico.

«**Estado ecológico**»: Una expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales clasificado con arreglo a este real decreto.

«**Estado químico**»: Una expresión de la calidad de las aguas superficiales que refleja el grado de cumplimiento de las NCA de las sustancias prioritarias y otros contaminantes del anexo IV de este real decreto.

«**Estudio ambiental estratégico**»: estudio elaborado por el promotor que, siendo parte integrante del plan o programa, identifica, describe y analiza los posibles efectos significativos sobre el medio ambiente derivados o que puedan derivarse de la aplicación del plan o programa, así como unas alternativas razonables, técnica y ambientalmente viables, que tengan en cuenta los objetivos y el ámbito territorial de aplicación del plan o programa, con el fin de prevenir o corregir los efectos adversos sobre el medio ambiente de la aplicación del plan o programa.

«**Estudio de impacto ambiental**»: documento elaborado por el promotor que acompaña al proyecto e identifica, describe, cuantifica y analiza los posibles efectos significativos sobre el medio ambiente derivados o que puedan derivarse del proyecto, así como la vulnerabilidad del proyecto ante riesgos de accidentes graves o de catástrofes, el riesgo de que se produzcan dichos accidentes graves o catástrofes y el obligatorio análisis de los probables efectos adversos significativos en el medio ambiente en caso de ocurrencia. También analiza las diversas alternativas razonables, técnica y ambientalmente viables, y determina las medidas necesarias para prevenir, corregir y, en su caso, compensar, los efectos adversos sobre el medio ambiente.

«**Evaluación ambiental**»: proceso a través del cual se analizan los efectos significativos que tienen o pueden tener los planes, programas y proyectos, antes de su adopción, aprobación o autorización sobre el medio ambiente, incluyendo en dicho análisis los efectos de aquellos sobre los siguientes factores: la población, la salud humana, la flora, la fauna, la biodiversidad, la geodiversidad, la tierra, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, el clima, el cambio climático, el paisaje, los bienes materiales, incluido el patrimonio cultural, y la interacción entre todos los factores mencionados. La evaluación ambiental incluye tanto la evaluación ambiental estratégica, que procede respecto de los planes o programas, como la evaluación de impacto ambiental, que procede respecto de los proyectos. En ambos casos la evaluación ambiental podrá ser ordinaria o simplificada y tendrá carácter instrumental respecto del procedimiento administrativo de aprobación o de adopción de planes y programas, así como respecto del de autorización de proyectos o, en su caso, respecto de la actividad administrativa de control de los proyectos sometidos a declaración responsable o comunicación previa.

«**Indicador**»: Medida de un elemento de calidad que permite evaluar la calidad y el estado de las aguas.

«**Informe de Impacto Ambiental**»: informe preceptivo y determinante del órgano ambiental con el que finaliza la evaluación de impacto ambiental simplificada.

«**Masa de agua muy modificada**»: Una masa de agua superficial que, como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, ha experimentado un cambio sustancial en su naturaleza.

«**Masa de agua superficial**»: Una parte diferenciada y significativa de agua superficial, como un lago, un embalse, una corriente, río o canal, parte de una corriente, río o canal, unas aguas de transición o un tramo de aguas costeras.

«**Mejores Técnicas Disponibles**»: La fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir la

base de los valores límite de emisión y otras condiciones de la autorización destinadas a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente y la salud de las personas.

«Modificación no sustancial»: Cualquier modificación de las características o del funcionamiento, o de la extensión de la instalación, que, sin tener la consideración de sustancial, pueda tener consecuencias en la seguridad, la salud de las personas o el medio ambiente.

«Modificación sustancial»: Cualquier modificación realizada en una instalación que, en opinión del órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada y de acuerdo con los criterios establecidos el Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, pueda tener repercusiones perjudiciales o importantes en las personas y el medio ambiente.

«Norma de calidad ambiental (NCA)»: Concentración de un determinado contaminante o grupo de contaminantes en el agua, los sedimentos o la biota, que no debe superarse en aras de la protección de la salud humana y el medio ambiente. Este umbral puede expresarse como Concentración Máxima Admisible (NCA-CMA) o como Media Anual (NCA-MA).

«Organismo de cuenca»: organismo público que gestiona las aguas en las demarcaciones hidrográficas. En las cuencas del Estado recibe el nombre de *confederación hidrográfica*. En las cuencas gestionadas por las Comunidades Autónomas hay también organismos de cuenca, aunque reciban otros nombres, como *agencias*, y su naturaleza jurídica puede ser variada, dedicándose en algunas ocasiones a funciones puramente empresariales que son distinguibles de las propias de los organismos de cuenca.

«Órgano ambiental»: órgano de la Administración pública que elabora, en su caso, el documento de alcance, que realiza el análisis técnico de los expedientes de evaluación ambiental y formula las declaraciones ambientales estratégicas, los informes ambientales estratégicos, las declaraciones de impacto ambiental, y los informes de impacto ambiental.

«Órgano competente para otorgar la Autorización Ambiental Integrada»: El órgano designado por la comunidad autónoma en la que se ubique la instalación objeto de la autorización. En tanto no se produzca una designación específica por parte de la comunidad autónoma, se entenderá competente el órgano de dicha Administración que ostente las competencias en materia de medio ambiente.

«Órgano competente»: Cada uno de los organismos de cuenca, para las aguas superficiales continentales comprendidas en las demarcaciones hidrográficas que excedan del ámbito territorial de una comunidad autónoma, y las comunidades autónomas, para las aguas superficiales continentales de demarcaciones hidrográficas comprendidas íntegramente dentro del ámbito territorial respectivo, así como para las aguas costeras y de transición, sin perjuicio de las competencias del Estado en los puertos de interés general.

«Órgano sustantivo»: órgano de la Administración pública que ostenta las competencias para adoptar o aprobar un plan o programa, para autorizar un proyecto, o para controlar la actividad de los proyectos sujetos a declaración responsable o comunicación previa, salvo que el proyecto consista en diferentes actuaciones en materias cuya competencia la ostenten distintos órganos de la Administración pública estatal, autonómica o local, en cuyo caso, se considerará órgano sustantivo aquel que ostente las competencias sobre la actividad a cuya finalidad se orienta el proyecto, con prioridad sobre los órganos que ostentan competencias sobre actividades instrumentales o complementarias respecto a aquella.

«Personas interesadas»: se consideran personas interesadas a los efectos de la Ley 21/2013, de evaluación de impacto ambiental: 1.º Todas aquellas en quienes concurren cualquiera de las circunstancias previstas en el artículo 4 de la Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas. 2.º Cualesquiera personas jurídicas sin ánimo de lucro que, de conformidad con la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE), cumplan los siguientes requisitos: i) Que tengan, entre los fines acreditados en sus estatutos la protección del medio ambiente en general o la de alguno de sus elementos en particular, y que tales fines puedan resultar afectados por la evaluación ambiental. ii) Que lleven, al menos, dos años legalmente constituidas y vengan ejerciendo, de modo activo, las actividades necesarias para alcanzar los fines previstos en sus estatutos. iii) Que, según sus estatutos, desarrollen su actividad en un ámbito territorial que resulte afectado por el plan, programa o proyecto que deba someterse a evaluación ambiental.

«**Planes y programas**»: el conjunto de estrategias, directrices y propuestas destinadas a satisfacer necesidades sociales, no ejecutables directamente, sino a través de su desarrollo por medio de uno o varios proyectos.

«**Principio de jerarquía legislativo**»: Ordenación jerárquica o escalonada de las normas jurídicas de modo que las normas de rango inferior no pueden contradecir ni vulnerar lo establecido por una norma de rango superior que tiene mucho valor. El principio de jerarquía normativa permite establecer el orden de aplicabilidad de las normas jurídicas y el criterio para solucionar las posibles contradicciones entre normas de distinto rango. La Constitución garantiza expresamente el principio de jerarquía normativa.

«**Programa de seguimiento de las aguas**»: conjunto de actividades encaminadas a obtener una visión general coherente y completa del estado y calidad de las aguas. Puede comprender un conjunto de subprogramas de seguimiento o control.

«**Promotor**»: cualquier persona física o jurídica, pública o privada, que pretende realizar un proyecto de los comprendidos en el ámbito de aplicación de esta ley, con independencia de la Administración que sea la competente para su autorización.

«**Punto de muestreo**»: lugar geográfico de toma de muestra o datos.

«**Sustancia peligrosa**»: Las sustancias o grupos de sustancias que son tóxicas, persistentes y bioacumulables, así como otras sustancias o grupos de sustancias que entrañan un nivel de riesgo análogo.

«**Sustancia prioritaria**»: Sustancia que presenta un riesgo significativo para el medio acuático comunitario, o a través de él, incluidos los riesgos de esta índole para las aguas utilizadas para la captación de agua potables, y regulada a través del artículo 16 de la Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000. Entre estas sustancias se encuentran las sustancias peligrosas prioritarias.

«**Usos del agua**»: las distintas clases de utilización del recurso, así como cualquier otra actividad que tenga repercusiones significativas en el estado de las aguas. A efectos de la aplicación del principio de recuperación de costes, los usos del agua deberán considerar, al menos, el abastecimiento de poblaciones, los usos industriales y los usos agrarios.

«**Vulnerabilidad del proyecto**»: características físicas de un proyecto que pueden incidir en los posibles efectos adversos significativos que sobre el medio ambiente se puedan producir como consecuencia de un accidente grave o una catástrofe.

GLOSARIO

AAI: Autorización Ambiental Integrada	14
AAI': Modificación de la AAI	22
AAU: Autorización Ambiental Unificada	23
AMD: Acid Mine Drainage	46
AML: Acid Mine Lakes	94
APE: Autorización para la Puesta en Funcionamiento	22
APM: Autorización para la Puesta en Marcha	22
ARD: Acid Rock Drainage	45
ASM: Artisanal Scale Mining	47
BOE: Boletín Oficial del Estado	22
CA: Calificación Ambiental	23
CCAA: Comunidades Autónomas	21
CE: Comisión Europea	65
CNES: Centro Nacional de Estudios Espaciales	64
DIA: Declaración de Impacto Ambiental	6
DN: Niveles Digitales	59
DPH: Dominio Público Hidráulico	19
EA: Evaluación Ambiental	23
EAA: Estaciones Automáticas de Alerta	39
EC: Conductividad Eléctrica	98
EEPP: Estudios Previos	22
EIA: Evaluación de Impacto Ambiental	6
ESA: Agencia Espacial Europea	65
FPI: Faja Pirítica Ibérica	79
GEO: Grupo de Observación de la Tierra	65
GEOSS: Sistema global de Sistemas de Observación de la Tierra	65
GICA: Gestión Integrada de la Calidad Ambiental	23
IP: Información Pública	22
IPPC: Prevención y Control Integrados de la Contaminación	14
MDE: Modelo Digital de Elevación	62
MTD: Mejores Técnicas Disponibles	18

NCA: Normas de Calidad Ambiental	33
NGA: Agencia Geoespacial de Inteligencia Nacional	66
NIR: Infrarrojo cercano	52
OLI: Sensor operacional de imágenes de tierra	64
ORFEO: Optical & Radar Federated Earth Observation	67
OST: Observación Satelital Terrestre	49
PVA: Plan de Vigilancia Ambiental	41
RDL: Real Decreto Legislativo	15
RDPH: Reglamento del Dominio Público Hidráulico	29
SAICA: Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas	39
SAM: Sistemas Automáticos de Medida	107
SGMA: Sistema de Gestión Medioambiental	22
SIG: Sistema de Información Geográfica	76
SPOT: Space Probatoire d'Observation de la Terre	64
SWIR: Infrarrojo medio	52
TIR: Infrarrojo lejano	52
TIRS: Sensor Infrarrojo Térmico	64
TRLA: Texto Refundido de la Ley de Aguas	28
UE: Unión Europea	14
UV: Ultravioleta	52
VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado	104
VAT: Vehículos Aéreos Tripulados	56
VIS: Visible	52
VLE: Valores Límites de Emisión	21
XRD: Difracción de Rayos X	106
XRF: Fluorescencia de rayos X	106