

CONAMA

**TELEDETECCIÓN Y SENSORES
MEDIOAMBIENTALES**

**Grupo de Trabajo GT-24
Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018
Fundación Conama**



RUMBO

20.30.



CONAMA 2018

26
NOV

29
NOV

PALACIO MUNICIPAL
DE CONGRESOS, MADRID

WWW.CONAMA2018.ORG

ENTIDAD ORGANIZADORA: Fundación Conama

PARTICIPANTES

Coordinadores

- José Javier Martínez Vázquez. Coordinador del Grupo de Trabajo.

Relatores

- Adolfo Comerón i Tejero. Catedrático de la Escuela de Telecomunicación de Barcelona. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).
- Alfonso Santos Alonso Benito. Ingeniero de Montes. Colegio y Asociación de Ingenieros de Montes.
- Daniel Carrasco Díaz. Jefe de Área. Hisdesat Servicios Estratégicos.
- Jorge del Valle Arias. Responsable del Departamento de IoT. Aicox Soluciones, S.A.
- José Antonio Delgado Penín. Catedrático Emérito. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- José Daniel M. de la Rioja y del Nido. Personal Investigador . Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Michaël Sicard. Titular de Universidad / Profesor. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- Nicanor Prendes Rubiera. Oficina Española de Cambio Climático (OECC).
- Pedro Oñorbe de Torre. Responsable de Medio Ambiente del COIIM. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM).
- Victoriano Moreno Burgos. Hisdesat Servicios Estratégicos.

Comité técnico

- Adolfo Comerón i Tejero. Catedrático de la Escuela de Telecomunicación de Barcelona. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).
- Alfonso Santos Alonso Benito. Ingeniero de Montes. Colegio y Asociación de Ingenieros de Montes.
- Daniel Carrasco Díaz. Jefe de Área. Hisdesat Servicios Estratégicos.
- Eduardo M. de Rioja y del Nido. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Jorge del Valle Arias. Responsable del Departamento de IoT. Aicox Soluciones, S.A.
- José Antonio Delgado Penín. Catedrático Emérito. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- José Daniel M. de la Rioja y del Nido. Personal Investigador . Universidad Politécnica de

Madrid (UPM).

- José Javier Martínez Vázquez. Coordinador del Grupo de Trabajo. Instituto de la Ingeniería de España (IIE).
- Josefina de la Fuente. Directora general. Technet.
- Laura Martín Forero. Técnico sénior. Ineco.
- Manuel Pujadas Cordero. Jefe de la Unidad de Emisiones Contaminantes. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- Michaël Sicard. Titular de Universidad / Profesor. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).
- Nicanor Prendes Rubiera. Oficina Española de Cambio Climático (OECC).
- Pedro Oñorbe de Torre. Responsable de Medio Ambiente del COIIM. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM).
- Victoriano Moreno Burgos. Hisdesat Servicios Estratégicos.

Índice

1. RESEÑA PROFESIONAL DE LOS PONENTES	4
2. UAS CIVILES (HAPS) Y OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. ASPECTOS TÉCNICOS	8
2.1. Resumen.....	8
2.2. Introducción	8
2.3. ¿Qué son los HAPs?	9
2.4. Breve historia de los HAP's	12
2.5. Proyectos en marcha en Europa	13
2.5.1. ZEPHIR.....	13
2.5.2. Stratobus.....	14
2.6. Observación de la tierra mediante HAP's [6]	16
2.7. Futuro: colaboración entre HAP's y satélites artificiales	17
2.8. Conclusiones.....	18
2.9. Bibliografía.....	18
3. PREVISIONES DE TRANSPORTE ATMOSFÉRICO DE POLEN: ESTUDIO SOBRE LAS ESPECIES DE PLATANUS Y PINUS EN BARCELONA	19
3.1. Resumen.....	19
3.2. Introducción	20
3.3. Polen atmosférico y métodos de medida	20
3.4. Modelización	22
3.5. Simulaciones del transporte de PINUS.....	22
3.6. Agradecimientos.....	24
3.7. Bibliografía.....	24
4. USOS Y SERVICIOS DEL SATÉLITE ESPAÑOL PAZ SAR ASOCIADOS A LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL TERRITORIO	26
4.1. La misión PAZ	26
4.2. Características	26
4.3. Los servicios del satélite PAZ.....	28
4.3.1. Vigilancia marítima	28
4.3.2. Descripción del servicio	28
4.3.3. Beneficios.....	28
4.3.4. Clientes	28
4.4. Defensa y seguridad	30
	0

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

4.4.1. Descripción del servicio	30
4.4.2. Beneficios.....	30
4.4.3. Clientes	30
4.5. Ordenación del territorio, ingeniería civil e infraestructuras.....	31
4.5.1. Descripción del servicio	31
4.5.2. Beneficios.....	31
4.5.3. Clientes	31
4.6. Riesgos y emergencias.....	32
4.6.1. Descripción del servicio	32
4.6.2. Beneficios.....	32
4.6.3. Clientes	33
4.7. Vigilancia medioambiental	33
4.7.1. Descripción del servicio	33
4.7.2. Beneficios.....	33
4.7.3. Clientes	34
5. TECNOLOGÍAS DE CONECTIVIDAD PARA APLICACIONES DE MONITORIZACIÓN AMBIENTAL. TECNOLOGÍAS LPWAN	35
5.1. Resumen.....	35
5.2. El internet de las cosas y el medio ambiente	35
5.3. Arquitectura de una solución IOT. Conectividad.....	36
5.4. Redes LPWAN	39
5.5. Comparación de tecnologías LPWAN	47
5.6. Conclusiones. El futuro del IOT	48
6. LA TELEDETECCIÓN FORESTAL EN ESPAÑA USANDO LANDSAT-8 OLI/TIRS Y SENTINEL-2 MSI EN EL PERÍODO 2013-2018	50
6.1. Resumen.....	50
6.2. Introducción	50
6.3. Landsat-8 OLI/TIRS	51
6.4. Sentinel-2	52
6.5. Teledetección forestal con Landsat-8 y Sentinel-2	54
6.5.1. Diseño del análisis.....	54
6.6. Revistas del JCR.	55
6.7. Revista de la Asociación Española de Teledetección.	58
6.8. Base de datos TESEO.	60



TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

6.9. Conclusiones.....	62
6.10. Agradecimientos.....	63
6.11. Bibliografía.....	63
7. TELEDETECCIÓN Y GIS. HERRAMIENTAS DE GESTIÓN PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO	64
7.1. Introducción	64
7.2. Planteamiento del Problema.....	65
7.3. Propuesta Metodológica	66
7.4. Propuesta Metodológica	67
7.5. Caso de Estudio	68
7.6. Conclusión	75
7.7. Bibliografía.....	76
8. LA TELEDETECCIÓN APLICADA EN AGRICULTURA.....	82
8.1. Teledetección.	82
8.1.1. Fases en la teledetección. El espectro electromagnético.	82
8.2. Usos de la teledetección en agricultura	84
8.2.1. Índices utilizados en agricultura de precisión.....	84
8.3. Toma de datos.....	85
8.3.1. Equipos portantes.....	85
8.3.2. Satélites	85
8.3.3. Vehículos aéreos tripulados	89
8.3.4. Drones.....	89
8.3.5. Equipos de tierra.....	90
8.3.6. Cámaras	90
8.3.7. Sistemas de control	91
8.4. Traspaso de datos.....	91
8.4.1. Acumuladores de datos	91
8.4.2. Trabajo en la nube. Big-data.....	91
8.5. Posprocesado	92
8.5.1. Las plataformas gis utilizados en agricultura.....	92
8.6. Resumen de últimas tendencias	93
8.7. Curiosidades	93
9. ANTENAS MULTI-HAZ EN TECNOLOGÍA IMPRESA PARA PLATAFORMAS A GRAN ALTURA	96



TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

9.1. Resumen.....	96
9.2. Las comunicaciones mediante plataformas a gran altura (HAPS).....	96
9.2.1. Arquitecturas de red y regulación	98
9.2.2. Antenas para HAPS	100
9.3. Antenas reflectarray para HAPS	103
9.3.1. Diseño de una antena reflectarray multi-haz para HAPS	106
9.4. Conclusiones.....	115
9.5. Agradecimientos.....	116
9.6. Bibliografía.....	116
10. LA NUEVA GENERACIÓN WI-FI: REDES LIGHT FIDELITY.	119
10.1. Resumen	119
10.2. Introducción.....	119
10.3. Comunicaciones ópticas no guiadas (OWC)	120
10.3.1. Diodos led y fotodiodos.....	121
10.3.2. Funcionamiento en modo pequeña señal de un diodo led.....	125
10.4. Sistemas VLC.....	126
10.5. Las nuevas redes LI-FI	126
10.5.1. El enlace descendente.	128
10.5.2. El enlace ascendente	129
10.6. Redes híbridas WI-FI y LI-FI.....	131
10.7. Conclusiones	133
10.8. Bibliografía.....	133

1. RESEÑA PROFESIONAL DE LOS PONENTES

Adolfo Comerón i Tejero

Ingeniero de Telecomunicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, doctorado en la Universidad Paris-XI (Orsay, Francia). Catedrático del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actividad de investigación actual: teledetección atmosférica mediante lidar y comunicaciones ópticas no guiadas.

José Antonio Delgado

Catedrático de Universidad del Área de Sistemas de Telecomunicación de la UPC-Barcelona.TECH durante más de treinta años, en 2013 es nombrado Catedrático Emérito de la UPC-Barcelona.TECH. Ingeniero de Telecomunicación (1968) y Doctor Ingeniero de Telecomunicación (1973) por la E.T.S.I.T. de la Universidad Politécnica de Madrid. Ha realizado estancias en Holanda en Philips Gloenlampen N.V (1967) y durante tres años realizó estudios de postgrado en el Politécnico de Turín (1968- 1971). Fue uno de los fundadores de la E.T.S.E.T. de Barcelona. Desde el año 2000 está trabajando en temas relacionados con el uso de las tecnología UAS (Unmanned aircraft systems). Ha participado en programas europeos relacionados con el uso de HAPs (UAS para uso civil): Helinet, Capanina y varias Acciones COST sobre este tema. Ha publicado el primer libro en el mundo sobre HAPs (2008), traducido al chino con alguna puesta al día (2014). Es autor de diversas publicaciones sobre estos temas en revistas de ámbito internacional. En el año 2000 le fue concedida la IEEE Milenium Medal.

Victoriano Moreno Burgos

Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Más de 40 años de experiencia desarrollando actividades de Observación de la Tierra desde el Espacio. Ha trabajado en INTA y en INDRA donde ha desempeñado el cargo de Director de la Unidad de Negocio de Sistemas de Observación de la Tierra. Actualmente trabaja en HISDESAT, siendo Asesor Senior para temas de Observación de la Tierra dentro de la Misión del Satélite Español PAZ en la Dirección de Desarrollo de Negocio de dicha empresa.

Michaël Sicard

(BE'95, PhD'00) is an Associate Professor at the Department of Signal Theory and Communications from the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) in Barcelona, Spain. He obtained his PhD degree in the field of "physical methods for remote sensing" at the Service d'Aéronomie from the Institut Pierre-Simon-Laplace in Paris, France. After a short stay in 2001 at the Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection from the University of Sherbrooke in Sherbrooke, Canada, he joined the UPC with a European Space Agency external fellowship grant in 2002 and followed on with a Ramón-y- Cajal Spanish contract in 2004.

His main research interests are twofold: (i) on a technical point of view, the development of lidar techniques and instruments in all their aspects for aerosol observations, and (ii) the characterization of aerosol properties and of their impact on the atmospheric radiative budget. The latter includes aerosol optical and microphysical characterization, and aerosol typing thanks to data fusion (in-situ, remote sensing, satellite) and modeling. He is coordinator of the

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Spanish/Portuguese lidar network, SPALINET, and the Spanish contact point of the international project ChArMEx (Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment). He has published more than 65 papers in peer-reviewed journals, and made more than 120 international conference presentations/posters.

Daniel Carrasco

Ingeniero de Telecomunicación con un doctorado en teledetección radar por la Universidad Politécnica de Cataluña y Máster en Administración de Empresas por el IESE. Es experto en Observación de la Tierra con 26 años de experiencia en aplicaciones y segmento terreno de satélite.

Fue científico invitado en la Agencia Espacial Alemana (DLR) durante la preparación de su tesis doctoral. La mayor parte de su carrera profesional se ha desarrollado en Indra Espacio en Madrid, donde llegó a ser Responsable de Ingeniería del Departamento de Observación de la Tierra y Jefe de Área de Sistemas de Observación de la Tierra. Durante ese periodo fue también jefe de proyecto y responsable técnico de numerosos proyectos de sistemas y aplicaciones de la tecnología radar de satélite. Desde 2017 es jefe de Desarrollo de Negocio de Observación de la Tierra en Hisdesat, el operador y propietario del satélite radar PAZ.

Jorge del Valle Arias

Ingeniero de Telecomunicación por la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM y responsable del Departamento de IoT de Aicox Soluciones, S.A. con 20 años de experiencia en proyectos y despliegues de redes móviles y soluciones M2M/IoT. Ha sido fundador de Galtel, una ingeniería especializada en sistemas de monitorización y control con tecnologías inalámbricas aplicadas al sector agrícola y medioambiental, con especial enfoque en el uso de nuevas tecnologías para optimización del uso de los recursos e insumos.

Alfonso Alonso Benito

Ingeniero Técnico Forestal por la UPM e Ingeniero de Montes por la UVA. Desarrolló su tesis doctoral en la Universidad de La Laguna sobre la fusión de imágenes de satélite de muy alta resolución espacial con datos LIDAR, para el cartografiado de combustibles forestales. Entre sus áreas de interés, se encuentra la realización de inventarios forestales con datos de satélite y el cartografiado de áreas quemadas. El Dr. Alonso Benito, es autor de diversas comunicaciones a congresos tanto nacionales como internacionales y de publicaciones en revistas especializadas de ámbito internacional. Actualmente, colabora con el grupo de investigación GOTA de la Universidad de La Laguna, e imparte en forma online, un curso sobre teledetección forestal.

Nicanor Prendes Rubiera

Es geólogo (1982) por la universidad de Oviedo, Asturias, (España), donde obtuvo –también– su suficiencia investigadora con el estudio sobre “Seguimiento, por Técnicas Digitales de Imágenes, del Acetato de Uranilo, en la Determinación de la Patologías del Hormigón” que fue el trabajo base para preparar su tesis de licenciatura y, en la misma universidad, desarrolla su doctorado bajo la dirección del profesor Dr. M. Montoto San Miguel, sobre “Determinación de Parámetros Petrográficos en Cementos y Hormigones mediante Técnicas de Tratamiento y Procesado Digital de Imágenes”. Asimismo, se Diploma en Análisis de Materiales: Emisión de

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Rayos X, Electrones e Iones. CSIC (Instituto de Ciencias de Materiales de Sevilla). Universidad. 1995.

Funcionario de Carrera desde 1992 como Técnico Facultativo Superior de OO. AA del MOPU, adscrito al CEDEX-Ministerio de Fomento, con responsabilidades Técnicas y Dirección de proyectos (Carreteras, Puertos, Dragados, Impactos Ambientales, Huellas acústicas, etc.), incluyendo trabajos en el departamento de Medio Ambiente e Isótopos Radiactivos (trazadores de Deuterio y Tritio). Director del Programa de Medio Marino en el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX), centrado en la gestión de Dragados Portuarios y Sistemas de Información Geográfica asociados. Desde el 2016 se integra en la Subdirección General de Adaptación a las Acciones frente al Cambio Climático (Oficina Española de Cambio Climático) del actual Ministerio para la Transición Ecológica.

Es docente, universitario, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid; Profesor en el CSIC (Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”) donde imparte cursos sobre Sostenibilidad, Eficiencia Energética, Evaluación e Edificios y Estructuras. Adquiere la membresía en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, como evaluador del CINDOC para la supervisión y valoración de trabajos de Investigación (I+D+i), desde 2000, tanto en el ministerio de Ciencia y Tecnología, como en las universidades de Asturias, Madrid y Valencia, en España; y miembro del Comité Científico de la Revista “Ingeniería Solidaria” de Bogotá (Colombia).

Da clases de formación, como profesor, en el COEX (Conservación y explotación de carreteras) en el programa del Ministerio de Fomento (“Áridos para Carreteras y Puentes”. CEDEX. 1996). Colaborador en proyectos de investigación (Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, IBERDROLA, etc.), relacionadas con la obra pública, infraestructuras y Medio Ambiente. Pertenece a los grupos de trabajo sobre Normalización, (Comité de Áridos para Hormigón -SC-10 de RAA –Reacción Alkali-Árido- en Asociación Española de Normalización, AENOR). Al Comité INSPIRE para la gestión de Datos geográficos (IGN-AEMET), y el de Inundaciones (Ministerio de Medio Ambiente), así como a SPANDCOLD (Presas y Embalses). Debido a la especialidad y desarrollo del trabajo de su tesis doctoral es requerido como Perito experto en el juicio del Prestige para el análisis digital de las imágenes térmicas del siniestro del buque. Asimismo es invitado a Perú por la Sociedad Geológica, el INGEMET y el ANA (Autoridad Nacional del Agua) a unas charlas sobre peligros geológicos y Cambio Climático (2013).

Pedro Oñorbe de Torre

Ingeniero Industrial por la ETSII-UPM y miembro de la Asociación Española de Teledetección (AET). Ha trabajado durante muchos años en proyectos de tratamientos de aguas y de basuras por tecnologías de bajo coste, tanto en su puesto de jefe de tratamientos de residuos urbanos en diversas empresas del INI como en asesorías a empresas de servicios. Es especialista en proyectos de teledetección para uso en aplicaciones de ingeniería civil sobre todo en agricultura de precisión y en aplicaciones medioambientales en minería y limnología. Lleva directamente el desarrollo de tecnologías de aplicaciones de teledetección para empresas del Centro de Investigaciones Aeroportadas de Rozas (CIAR) en Lugo.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Colaborador habitual en el Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM) donde es Vocal de la Comisión de Medio Ambiente y dirige el Grupo de Trabajo de “teledetección y drones”. Coordina por el COIIM la participación en proyectos de innovación con la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (F2I2), organismo que agrupa los distintos Laboratorios de Investigación de la Escuela ETSII-UPM. También, desarrolla asesoría a colegiados en proyectos medioambientales y de desarrollo rural en Latinoamérica.

Daniel M. de Rioja del Nido

Grado en Tecnologías y Servicios de Telecomunicación y Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Es autor de publicaciones y comunicaciones a congresos sobre antenas reflectoras planas en tecnología impresa. Cursa estudios de doctorado en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la UPM, bajo la dirección del Profesor José A. Encinar. En el Congreso de la Unión Internacional de Radio Científica URSI 2017 celebrado en Cartagena (Murcia), recibió un Accessit al Premio Investigador Joven. Daniel M. de Rioja del Nido is member of the IEEE.

José Javier Martínez Vázquez

En 1996 comienza su participación en el Congreso Nacional del Medio Ambiente y desde el año 2000 coordina este Grupo de Trabajo sobre Teledetección y Sensores Medioambientales. Dr. Martínez Vázquez is senior member of the IEEE.

2. UAS CIVILES (HAPS) Y OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. ASPECTOS TÉCNICOS

José Antonio Delgado Penín. Doctor Ingeniero de Telecomunicación. Catedrático Emérito. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

2.1. Resumen

Las plataformas aeronáuticas (dirigibles o aeronaves) pilotadas remotamente y volando en la estratosfera vuelven a estar de actualidad para diversas aplicaciones y, entre otras las relacionadas con la Observación de la Tierra. En esta ponencia se presentará el estado actual de las aplicaciones civiles de la tecnología UAS de gran altura (vuelos estratosféricos para fines de Observación de la Tierra). Dichas plataformas no tripuladas reciben nombres diversos, tales como “Pseudo-satélites”, HAP’s (High Altitude Platforms) o también “drones de gran altura”. El artículo está compuesto por diversos párrafos que incluyen: una Introducción, a la que sigue una respuesta a la pregunta de ¿qué son los HAP’s? A continuación se describe brevemente la historia de los mismos hasta la actualidad (proyecto de NASA y Helinet en la UE). Posteriormente, se continúa comentando los proyectos más importantes que hay en marcha en el mundo hoy en día (los proyectos ZEPHIR, STRATOBUS y ESA) y cómo se puede llevar a cabo la Observación de la Tierra con HAP’s. Actualmente hay proyectados servicios (inclusive algunos ya probados) para circunstancias muy concretas y, se han realizado pruebas de viabilidad técnica. Siguiendo aspecto importante es el de la posible colaboración de los HAP’s con los satélites artificiales de la Tierra para llevar a cabo labores de Teledetección. Finalmente se concluye con una argumentación de los pros y contras de esta tecnología para usos civiles.

2.2. Introducción

Las plataformas aéreas no tripuladas de gran altura reciben nombres diversos, tales como HALE (High Altitude Long Endurance), o también HAPS (High Altitude Pseudo-Satellites) o (High Altitude Platforms Station) [1]. Pueden considerarse como “Pseudo-satélites” (punto de vista de la Agencia Espacial Europea) porque su diseño y desarrollo considera conceptos y planteamientos que suelen seguirse en el campo de la tecnología de los satélites artificiales. Las ventajas que se prospectan bien utilizando los HAPS solamente o formando parte de redes satelitales no ofrecen duda alguna desde la década de los 80 (siglo XX). El problema principal es su coste de inversión y la falta de regulaciones aeronáuticas y radioeléctricas claras y definitivas. Los HAPS pueden utilizarse en situaciones de emergencias terrestres, como es el caso de inundaciones, avenidas, terremotos, fuegos de grandes dimensiones, etc. Son factibles para el control del medio ambiente de grandes extensiones territoriales [2].

En lo que sigue se hace una breve presentación de qué son los HAPS y porqué vuelan en la estratosfera con cargas de pago elevadas lo que facilita su uso para los posibles servicios

civiles. En el siguiente apartado se hace una descripción esquemática de cómo pueden operar con las ayudas radioeléctricas para despegar, mantenerse en vuelo y aterrizar.

En el apartado 3 se hace una recopilación de antecedentes históricos sobre HALE no europeos con predominancia de los vehículos de USA. El apartado 4 se dedica a comentar los proyectos europeos importantes y únicos sobre HAPS. El apartado 5 se comenta la aplicación a la observación de la Tierra y sus aspectos técnicos más sobresalientes. El apartado 6 comenta brevemente el Futuro y siguen unas conclusiones.

2.3. ¿Qué son los HAPS?

Los HAPS fueron considerados interesantes en el mundo civil debido a las peculiaridades que pueden ofrecer las plataformas aeronáuticas en determinadas condiciones de despegue, vuelo (parking) en la estratosfera y aterrizaje en tierra. Suelen contemplarse dos posibles tecnologías para las plataformas: los dirigibles y las aeronaves con ala fija. Aquí no se van a comentar aspectos propios de la ingeniería aeronáutica asociados a estas plataformas. No obstante, pueden considerarse algunos aspectos técnicos que son importantes para el vuelo de los HAPS:

- a) Vuelo estacionario, es decir, la capacidad de permanecer en un punto de la estratosfera predefinido durante un tiempo razonable.
- b) Estabilidad en la altitud de la plataforma.
- c) Altitud de operación, que condiciona las radiocomunicaciones y la observación de la Tierra.
- d) Disponibilidad a bordo de energía eléctrica para las diferentes cargas de pago.
- e) Duración de la misión. Esto condiciona la posibilidad de ofrecer servicio de forma continuada.

Un factor importante en el segmento estratosférico es el relacionado con las posibles alturas de vuelo en la estratosfera. Los factores de altura, presión atmosférica y velocidad del viento entre 11 km y 25/ 30 km son favorables para este tipo de plataformas.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

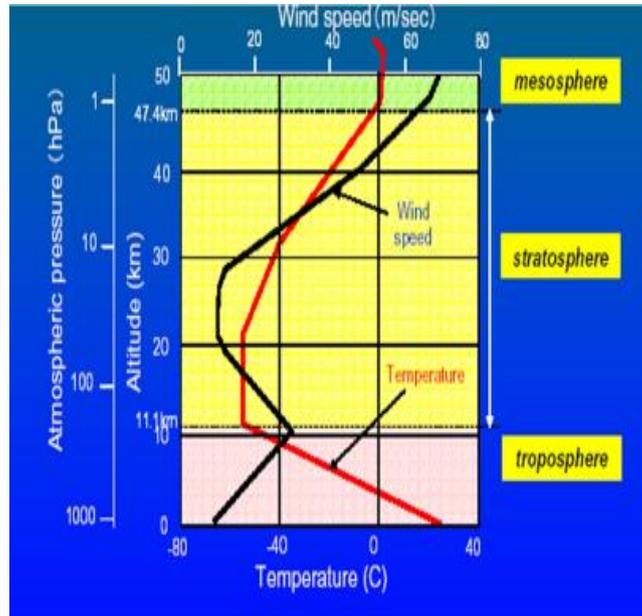


Ilustración 1: Presión atmosférica, velocidad del viento y temperatura en función de la altitud.

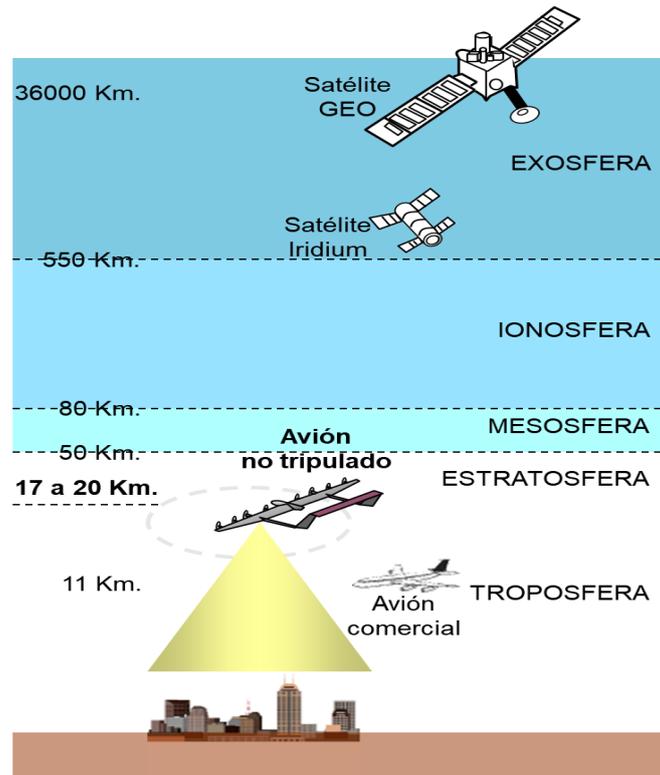


Ilustración 2: Altitud respecto a la superficie terrestre de un HAP y otras aeronaves.

La plataforma debe acomodarse a las condiciones de baja densidad y frío del aire estratosférico que pueden afectar a las hélices de las plataformas y a la refrigeración. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el que está relacionado con el vuelo de una

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

plataforma por encima de las rutas del tráfico aéreo comercial y, por otra parte, las misiones con duraciones largas, tienen varias implicaciones:

- Entre las varias fuentes de energía a usar para mantener en posición la plataforma, sólo se puede utilizar la energía solar (si se quiere obtener un coste del sistema bajo).
- Por otra parte, el uso de la energía solar requiere considerar algún subsistema de almacenamiento para la situación de falta de luz solar nocturna. Un HAPS provisto con baterías y con paneles solares cubriendo la superficie alar es una aeronave eléctrica no tripulada que es capaz de producir suficiente electricidad para funcionar día y noche y que podrá mantenerse en el aire durante largos periodos de tiempo.

La infraestructura de comunicaciones para soporte del funcionamiento de los HAPS se puede considerar constituida por dos “segmentos”: el aéreo (con posibilidad de soporte satelital) y el terrestre.

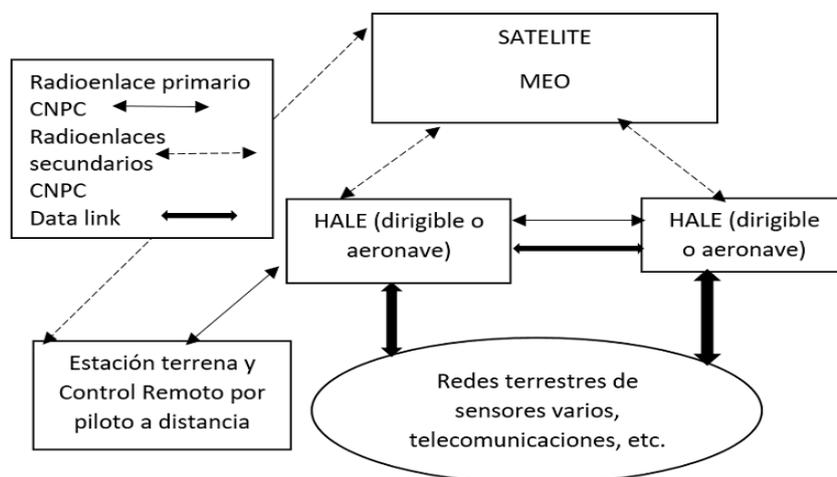


Ilustración 3: Infraestructura de telecomunicaciones para funcionamiento de HAP's.

Los subsistemas que engloba dicha infraestructura son los siguientes:

- Plataforma aeronáutica (dirigible o aeronave) pilotada por control remoto (HAPS).
- La estación de control terrestre del HAPS.
- El subsistema de comunicación para el control del tráfico aéreo (ATC) y, que no tiene por qué estar conectada con el HAPS.
- Los subsistemas para evitar colisiones con otras plataformas aeronáuticas u otros objetos que puedan encontrarse en la trayectoria que sigue el vuelo del HAPS (“Sense and avoid” systems).
- Los subsistemas de carga útil o de pago (Payload). Equipos para facilitar los diferentes servicios civiles que puede soportar el HAPS.

2.4. Breve historia de los HAP's

Fue a finales de la década de los setenta y principios de los ochenta del siglo XX que la tecnología de los HAPS tiene su punto de partida con una tecnología militar: los UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Los primeros ensayos de UAS civiles reutilizando tecnología militar fueron realizados en USA y Rusia con antiguas aeronaves del tipo U2 y volando a alturas estratosféricas (17-25 km) y para las finalidades de vigilancia y reconocimiento de objetivos en tierra. En la Figura que sigue se representa un esquema de la historia de estas plataformas.

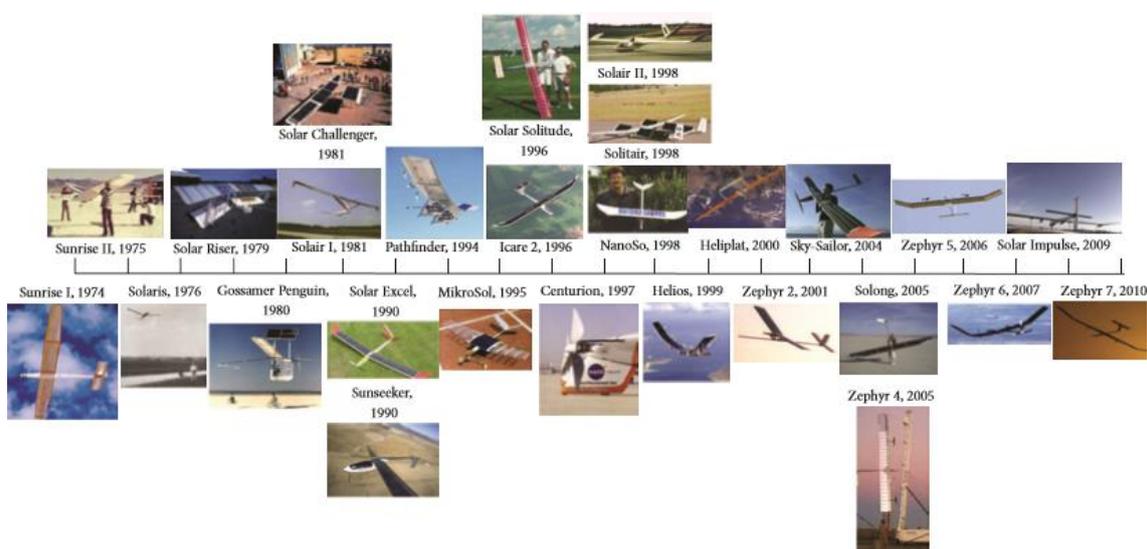


FIGURE 1: The main solar-powered flights around the world.

Ilustración 4: Evolución histórica de plataformas con energía solar.

En 1974, un grupo de ingenieros dirigidos por Robert Boucher llevó a cabo con éxito el primer vuelo de un avión solar, el Sunrise I. El avión, que tenía una envergadura de 35 pies pero pesaba sólo 10 Kilogramos, fue desarrollado bajo los auspicios de la DARPA como parte de una iniciativa para desarrollar aviones no tripulados con "Endurance" de decenas de horas. Durante la década de 1980 y a través de la década de 1990, la NASA también probó aeronaves no tripuladas de largas distancia y duración como un medio para recoger datos ambientales en los tramos superiores de la atmósfera. A finales de la década de 1980, la NASA contrató a la firma AeroVironment, que había estado trabajando en un prototipo de aeronave tripulada con energía solar, para desarrollar un avión solar no tripulado de larga duración. El prototipo resultante, llamado Pathfinder, demostró la viabilidad de utilizar energía solar para desarrollar aviones sub-orbitales no tripulados. Utilizando dos aviones desarrollados por Aurora Flight Sciences, el Perseo y el Teseo, los ingenieros de la NASA realizaron varias docenas de pruebas de vuelo entre 1993 y 1999. En los años noventa, la aeronave NASA Pathfinder con propulsión eléctrica voló a casi 25.000 metros de altitud, estableciendo entonces el récord para una aeronave de estas características. Un proyecto sucesor de aquel, el prototipo 'Centurion/Helios', se diseñó para ascender incluso más allá de los 30.000 metros y volar durante semanas o meses consecutivos sin detenerse. Durante la década siguiente, ingenieros tanto en los EE.UU. como en Europa trabajaron para mejorar la tecnología de vuelo solar y,

comenzaron a explorar la factibilidad del vuelo solar tripulado. Puede encontrarse una información histórica muy detallada de estas plataformas en la referencia bibliográfica [3].

2.5. Proyectos en marcha en Europa

En el ámbito empresarial privado europeo destacan dos entidades con solvencia para desarrollar dos tipos de HAPS con diferentes tecnologías. Airbus y Thales. En el caso de Airbus se sigue la línea tecnológica de mejora de una aeronave de ala fija con motores eléctricos y paneles solares en las alas. En el caso de Thales se sigue la línea de construir un nuevo dirigible según los avances tecnológicos actuales con paneles solares y motores eléctricos para la propulsión del dirigible [4-5].

2.5.1. ZEPHIR

Este nombre corresponde a un conjunto de plataformas aeronáuticas del tipo aeronave y desarrolladas por las compañías QinetiQ, luego Astrium y hoy Airbus, y cuyas principales características son:

- a) Propulsión eléctrica facilitada por energía solar durante la presencia del sol y por baterías de litio durante la noche.
- b) Poder volar (ya ha volado) por encima de los 18 km de altura con respecto a tierra (prueba en Dubai en 2014), con lo que no interfiere el tráfico aéreo, ni tiene problemas relacionados con el tiempo meteorológico.
- c) Se puede considerar como un “Pseudo-satélite” (HAPS) o HALE (grandes altitud y autonomía de vuelo respectivamente).
- d) Son plataformas completamente autónomas y no tripuladas.
- e) Pueden estar volando en la estratosfera hasta 14 días seguidos.
- f) Pueden ofrecer servicios de control medio ambiental (remote sensing).

Taxonomías

La primera plataforma de QinetiQ data del 2001. Esta firma inglesa desarrolló diversos modelos de aeronave. El más conocido fue el Zephyr 7. En el año 2013, Astrium (Airbus Defense) adquirió el proyecto Zephyr y desarrolló un nuevo modelo Zephyr 8 con prestaciones técnicas mejoradas en cuanto a mayor autonomía de vuelo, empleo de nuevas células solares más eficientes y reducción de peso de la plataforma aeronáutica. Las nuevas plataformas mejoradas de Airbus reciben el nombre de Zephyr S (single-tail) y T (twin-tail) que poseen especificaciones técnicas diferentes.



Ilustración 5: Zephir S (cola única) y Zephir T (doble cola).

Especificaciones técnicas

En imagen anterior pueden observarse los dos prototipos en desarrollo respectivamente y cuyas características previsibles son públicas.

- Modelo S (cola única):
 - Altitud de vuelo cerca de los 20 Km
 - Envergadura: 25 m
 - Peso de despegue: 62 - 65 kg
 - Operativo en 2017/2018
 - Posibles cargas útiles (Payload) para control medioambiental:
 - Equipos de registro de imágenes
 - Equipos de Radar y LIDAR
- Modelo T (doble cola):
 - Envergadura > 32 m
 - Peso de despegue: 145 kg
 - Operativo a partir de 2020
 - Posibles cargas útiles (Payload) para control medioambiental:
 - Equipos de registro de imágenes NIRS
 - Equipos de RADAR y LIDAR

2.5.2. Stratobus



Ilustración 6: Visión artística de un Stratobus de Thales-Alenia.

Esta palabra está registrada comercialmente por la empresa Thales-Alenia desde el año 2014 para indicar el nombre de un aerostato estratosférico rígido que puede combinar las mejores características técnicas de un “drón de gran altura” y de un satélite artificial con el que ofrecer diferentes servicios. Stratobus será un dirigible autónomo de misión múltiple con posibilidad de incorporarse a una red de satélites fijos en los que podría servir de relé. Esquema Figura 3. Especialmente adaptable para servicios de observación, a partir de Abril 2016 se produjo la puesta en marcha del proyecto Stratobus en Francia. En Diciembre 2016 se definió el concepto Stratobus y a mediados del 2017 (según noticias de Thales) se produjo el diseño preliminar que satisfará unas especificaciones técnicas para los diferentes servicios y, en 2018 se prevé que habrá una definición detallada de producción del prototipo sistema completo Stratobus (Dirigible y estaciones de control). En este Proyecto se propone un concepto innovador al integrar los instrumentos de tipo óptico con los equipos RADAR junto con las cargas útiles dedicadas a servicios de radiocomunicaciones y aquellas diseñadas ad-hoc para los servicios contratados utilizando los dirigibles Stratobus.

Especificaciones técnicas

- Altitud de vuelo cerca de los 20 Km
- Envergadura de 115 m de largo y 34 m de diámetro entre los puntos de mayor anchura del dirigible. Según las últimas informaciones incluirá cuatro motores laterales eléctricos para mejorar su navegación aérea.
- Peso de despegue aproximado 7 toneladas.
- Prototipos en 2020/2021
- Operativo en 2021/2022 el sistema más sencillo y 2025 uno más adaptable a exigencias del mercado

- Posibles cargas útiles (Payload)
- Peso aproximado según funciones desde 250 kg hasta 1000 kg.
 - Equipos de registro de imágenes de última generación
 - Equipos de RADAR (Radar Search Master) para funcionar en cualquier situación meteorológica de día y de noche de manera continuada.

2.6. Observación de la tierra mediante HAP's [6]

Las HAPS poseen el potencial de cubrir el “gap” entre los satélites artificiales y las aeronaves convencionales y no están sujetas a restricciones de mecánica orbital ni de consumo de energía procedente de carburantes. Sus principales ventajas en relación a los satélites incluyen distancias más cortas a los objetos a observar, con lo que se reduce la resolución espacial y el consumo de potencia transmisora. Además en relación a los satélites LEO, los HAPS se benefician de su capacidad para monitorear persistentemente un área terrestre durante intervalos de tiempo largos con lo que la resolución temporal se mejora considerablemente. En la Figura 7 que sigue, se pueden observar de forma gráfica las ventajas de cobertura que ofrecen los dirigibles.

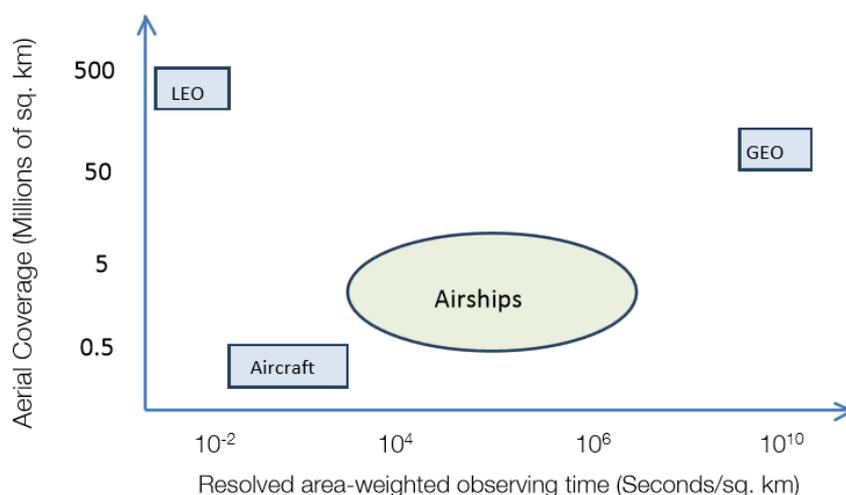


Ilustración 7: Relación entre el área de cobertura de satélites y aeronaves y el tiempo de observación por unidad de superficie (seg/km²).

Con los HAPS pueden utilizarse tecnologías propias del mundo satelital, por ejemplo: cámaras ópticas (Multi-espectral e hyper-espectral 9; cámaras térmicas; radares SAR; “Escanners” laser y la tecnología LIDAR. Es posible establecer estrategias de “aero-triangulación” mediante HAPS que lleven a bordo varios sensores. Según experiencias realizadas con equipos LIDAR, las alturas a las que pueden observar la Tierra los equipos embarcados en HAPS no ofrecerían dificultades para obtener resultados satisfactorios.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Un ejemplo es el empleo del LIDAR ALADIN de ESA en alturas estratosféricas. Podría implicar costes inferiores y consumo de potencia más reducido que en el caso de un satélite artificial.

Un aspecto importante a considerar es el de la calibración de los instrumentos de “sensing” a bordo de HAPS: es obligatoria; pero debido a su funcionamiento quasi-estacionario en la estratosfera solo se necesitaría una pre-calibración de los sensores remotos. El empleo de la tecnología LIDAR en los HAPS necesita siempre de la ayuda de un IMU (inertial motion unit) y un receptor GNSS con lo que se obtiene información sobre posición, rotación y movimiento de la plataforma de exploración. Se puede llegar así a una precisión de 1 a 3 cm sobre la superficie terrestre.

Algunas ventajas del uso de HAPS en cuanto a capacidades de observación de la Tierra pueden ser:

1. La toma de imágenes de altísima resolución (las cámaras están mucho más cerca de la Tierra que las de los satélites), lo que es esencial en labores de vigilancia y aplicaciones de seguridad.
2. La observación persistente, ya que el pseudo-satélite se mantiene encima del objetivo mientras que los satélites deben orbitar la Tierra y por tanto pasan por encima de la escena a gran velocidad. Este extremo podría habilitar la obtención de vídeo sobre zonas de interés, como por ejemplo el escenario de una catástrofe natural.

En resumen:

- a) reducción de la resolución espacial y menor consumo de potencia en el HAPS
- b) ampliación de la resolución temporal en Tierra debido a mayores tiempos de observación.

2.7. Futuro: colaboración entre HAP's y satélites artificiales

El presente y el futuro de los HAPS deben ser de colaboración con las redes de satélites artificiales ya existentes o que puedan ponerse en órbita para la Observación de la Tierra. La situación es diferente para los servicios de Telecomunicación. Podrán ser estaciones con cargas útiles embarcadas que sirvan de enlace con satélites LEO, MEO o GEO o también con RPAS que realicen funciones de Teledetección o monitoreo a alturas inferiores a las de los HAPS. Estos sistemas constituidos: por las plataformas estratosféricas y sus estaciones de control en tierra están sujetas a dos tipos de regulaciones internacionales: las aeronáuticas (caso europeo AESA) y las radioeléctricas (ITU-R). Ambas muy exigentes para su operatividad en la realidad.

En cuanto se refiere a la implementación comercial de los HAPS se debe seguir tres fases ya usuales en todo proceso tecnológico:

- **Fase 1:** Vuelo de un primer demostrador de tecnologías;

- **Fase 2:** Vuelo con un demostrador a tamaño reducido;
- **Fase 3:** Realización del primer vuelo “comercial” operativo con las Regulaciones Internacionales satisfechas.

2.8. Conclusiones

El mercado mundial considera el desarrollo industrial de esta tecnología para fines de Telecomunicaciones (Comunicaciones móviles de banda ancha) Observación de la Tierra y Controles de diversos tráficos de gran interés económico en los próximos años. Los principales fabricantes de equipos de USA, Rusia, Francia, China, Corea e Israel están desarrollando demostradores civiles y en algún caso particular hay funcionando algunos HAPS. La NASA y la ESA están llevando a cabo estudios para fines de Observación de la Tierra. La conclusión en la actualidad es llegar a construir sistemas con múltiples aplicaciones civiles y/o militares que satisfagan un coste económico factible y nunca en competición con los satélites artificiales para los mismos fines.

2.9. Bibliografía

- [1] A. Aragón, J. L Cuevas, José A. Delgado-Penín (2008, 2009, 2014). High-Altitude Platforms for wireless communications. Ed. John Wiley and National Defense Industry Press PRC. Libros. Dos ediciones en inglés y chino.
- [2] M.Pent, T.Tozer, J.A.Delgado-Penín (2002). HAPs for telecommunications and surveillance applications. Conferencia Europea de Microondas Wireless Technologies, (Milan,Italia).
- [3] F.A.D’Óliveira, F. C. Lourenço de Melo, Campos,T.C. Devezan, High Altitude Platforms - Present Situation and Technology Trends. Journal Aero. Techn. Management, pp.249-262,2016.
- [4] ZEPHYR <https://airbusdefenceandspace.com> ,
<https://www.airbus.com/defence/uav/zephyr.html>, <https://youtube/0UcMoHXobKM>
- [5] STRATOBUS <https://www.thalesgroup.com>
- [6] J. Gonzalo, D. López, D. Dominguez, A. García. A.Escapa, On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites. Progress in Aerospace Sciences, Elsevier, pp. 37-56, 2018.

3. PREVISIONES DE TRANSPORTE ATMOSFÉRICO DE POLEN: ESTUDIO SOBRE LAS ESPECIES DE PLATANUS Y PINUS EN BARCELONA

Michaël Sicard^{1,2}, Oriol Jorba³, Rebeca Izquierdo^{4,5,6}, Marta Alarcón⁴, Jordana Belmonte^{5,6}, Adolfo Comerón¹, Concepción De Linares^{5,6}, José Maria Baldasano^{7,3}

¹Remote Sensing Laboratory, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 08034, Spain; msicard@tsc.upc.edu

²Ciències i Tecnologies de l'Espai - Centre de Recerca de l'Aeronàutica i de l'Espai / Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (CTE-CRAE / IEEC), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 08034, Spain

³Earth Sienes Department, Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación, Barcelona, 08034, Spain

⁴Departament de Física, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 08036, Spain

⁵Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, 08193, Spain

⁶Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, 08193, Spain

⁷Environmental Modeling Laboratory, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 08034, Spain

3.1. Resumen

Las alergias al polen juegan un papel importante en la salud y el bienestar de las personas. Por lo tanto, es de gran interés público aumentar nuestro conocimiento del comportamiento de los granos de polen en la atmósfera (fuente, emisión, procesos involucrados durante su transporte, etc.) a escalas temporales y espaciales de resoluciones finas. Las primeras simulaciones con el modelo NMMB / MONARCH del Centro de supercomputación de Barcelona de la dispersión de *Platanus* y *Pinus* en la atmósfera se realizaron durante un evento de polinización de 5 días observado en Barcelona, España, entre el 27 y el 31 de marzo de 2015. Las simulaciones se comparan con los perfiles verticales medidos con el sistema lidar continuo de tipo Micro Pulse Lidar (MPL) de Barcelona. Los primeros resultados muestran que la distribución vertical está bien reproducida por el modelo en forma, pero no en intensidad, que el modelo subestima en gran parte por la tarde. Se proponen pautas para mejorar la modelización de la dispersión del polen en el aire mediante modelos de predicción numérica.

3.2. Introducción

Los materiales alergénicos respirables, como los granos de polen, constituyen un grave problema de salud pública en todo el mundo y tienen los impactos más importantes entre niños y adolescentes [1] [2]. Las enfermedades alérgicas de las vías respiratorias pueden aumentar aún más en el futuro debido a las actividades humanas intensivas que perturban el medio ambiente y cambian las prácticas de manejo de la tierra, lo que podría modificar la cantidad de polen, su alergenicidad, la duración de su temporada de emisión y sus distribuciones espaciales [3] [4].

Se han utilizado varios modelos numéricos para simular la dispersión del polen en la atmósfera en Europa [5] [6] y en los Estados Unidos [7]. La mayoría de estas simulaciones se limitan a eventos de polinización a corto plazo que afectan a una región más bien pequeña y se limitan a unos pocos tipos de polen. La evaluación de estas simulaciones casi siempre se realiza contra mediciones de concentración de polen in situ, pero casi no se conoce información sobre su desempeño en la columna atmosférica. En Europa, solo el modelo SILAM (System for Integrated modelling of Atmospheric composition [6]) del Instituto Meteorológico de Finlandia proporciona un pronóstico de la concentración del número de grano de polen a escala continental, pero sin realizar una evaluación de rutina.

Este trabajo presenta las primeras simulaciones, con el Nonhydrostatic Multiscale Meteorological Model on the B grid desarrollado en el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona con un Modelo de Transporte Químico recientemente añadido (NMMB/MONARCH), de la dispersión del polen de *Platanus* en la atmósfera que ocurrió durante un evento de polinización de 5 días en Barcelona, España, entre el 27 y el 31 de marzo de 2015. La evaluación del modelo en la columna atmosférica se realiza frente a medidas lidar continuas. Los resultados se discuten en términos de la parametrización del polen y los esquemas utilizados en el modelo.

3.3. Polen atmosférico y métodos de medida

Durante el evento considerado aquí, la concentración diaria y horaria de 93 tipos de polen se midió a partir de muestras de polen obtenidas mediante la trampa de polen de succión volumétrica basada en el principio de impacto, el método estandarizado en las redes aerobiológicas europeas. Más detalles sobre el instrumento y el método se pueden encontrar en [8] [9]. Las especies de interés en este trabajo son la de *Pinus* y *Platanus* (ver Fig. 1) que son especies relativamente grande en tamaño.

Las medidas de la distribución vertical del coeficiente de retrodispersión de partículas y de las relaciones de despolarización de volumen y de partículas se realizaron con el sistema Micro Pulse Lidar (MPL), modelo Sigma Space MPL-4B, de Barcelona que forma parte de la red MPLNET (Micro Pulse Lidar Network, <http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>). El diseño óptico del MPL de Barcelona utiliza un retardador de cristal líquido controlado activamente que hace que el sistema sea capaz de realizar mediciones sensibles a la polarización alternando

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

entre dos estados de retardo [10]. Las señales, llamadas "co-polar", P_{co} , y "cross-polar", P_{cr} , se utilizan para calcular la señal total, $P = P_{co} + 2P_{cr}$, que se invierte utilizando una relación lidar constante, de 50 sr para obtener el coeficiente de retrodispersión de partículas, y también se utilizan para calcular la relación de despolarización del volumen, δ^V , como:

$$\delta^V(z) = \frac{P_{cr}(z)}{P_{co}(z) + P_{cr}(z)}$$

En trabajos previos el polen se ha distinguido de otros tipos de partículas gracias a sus capacidades de despolarización (ver referencias en [8]). Por esta razón, la relación de despolarización de partículas también se calcula utilizando la ecuación (4) de [8]. Para cuantificar la contribución del polen a la relación de retrodispersión de partículas, se utiliza el método de [11] asumiendo que la mezcla externa de partículas observada está compuesta sólo por partículas despolarizantes (polen) y por otras mucho menos despolarizantes (todo lo demás, menos polen). El coeficiente de retrodispersión del polen, β_{pol}^{obs} se calcula utilizando ecuaciones (7) y (8) de [8]. La altura vertical, h_{pol} , hasta la que se extiende el penacho de polen, se calcula con un simple método de umbral [8].

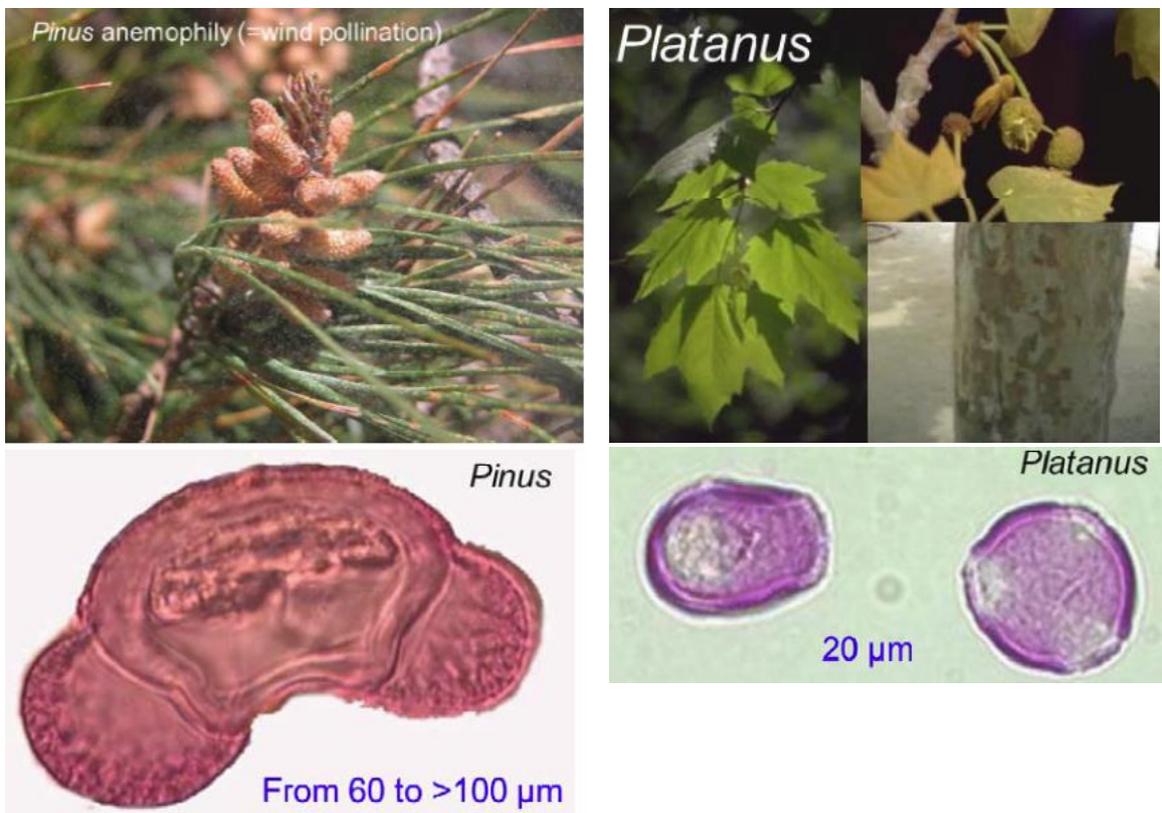


Ilustración 8: Fuente de las especies de *Pinus* y *Platanus* y vista microscópica de los granos.

3.4. Modelización

El modelo NMMB / MONARCH es el sistema de pronóstico de calidad del aire en línea desarrollado en BSC [12] [13]. La meteorología, los esquemas de transporte y la configuración de salida son los mismos que en [9].

Los dos tipos de polen predominantes durante el evento de polinización fueron *Pinus* y *Platanus* [8]. *Pinus* es un género importante de los paisajes españoles; *Platanus* es un árbol ornamental muy común en la calle de las áreas metropolitanas. Estos tipos de polen se seleccionaron en este estudio debido a sus altas concentraciones en el aire. Por esta razón, el esquema de aerosol del modelo se ha ajustado a únicamente estas 2 especies, cada una en una sola clase de tamaño. Los principales parámetros, reportados en la Tabla 1, están tomados de la literatura. Las distribuciones geográficas se obtienen de la Cartografía de hábitats de Cataluña para *Pinus* y del Servicio de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Barcelona para *Platanus*. La densidad del árbol de *Pinus*, 650 árboles / ha, proviene del Inventario Forestal de Cataluña, mientras que para *Platanus*, el número de árboles por píxel se entra directamente en el modelo. Las simulaciones de polen se realizan a escalas finas temporales (1 hora) y espaciales (1 x 1 km²). La concentración de polen, C_{pol}^{mod} kg / m³, se calcula en las coordenadas de la medida a través de una interpolación bilineal y se convierte en coeficiente de retrodispersión del polen como:

$$\beta_{pol}^{mod} = \frac{C_{pol}^{mod} \times 10^3 \times \sigma^*}{LR} * 10^6 [Mm^{-1}sr^{-1}]$$

Donde σ^* es la sección recta de extinción específica en m² / g a la longitud de onda de emisión del lidar de 532 nm. En una primera aproximación, se utiliza un valor de 0,6 m²/ g, tomado de [17] y medido para partículas de polvo del Sahara.

	<i>Pinus</i>	<i>Platanus</i>
Factor de emisión	81 g/día/árbol [14]	2.48 g/día/árbol [15]
Diámetro del grano	59 μm [16]	19 μm [7]
Densidad de grano	560 kg/m ³ [16]	920 kg/m ³ [7]

Ilustración 9: Parametrización del polen en el esquema de aerosoles de NMMB / MONARCH.

3.5. Simulaciones del transporte de PINUS

Durante los 2 días del evento sin actividad de polinización nocturna (o baja) cerca de la superficie (27 y 29 de marzo, respectivamente 27M y 29M, ver [8]), la Figura 2 muestra la

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

comparación modelo observación del promedio diario del coeficiente de retrodispersión del polen, la diferencia horaria β_{pol}^{mod} β_{pol}^{obs} y las prestaciones del modelo en términos de sesgo fraccional (fractional bias) y coeficiente de correlación calculado desde la altura mínima hasta h_{pol} .

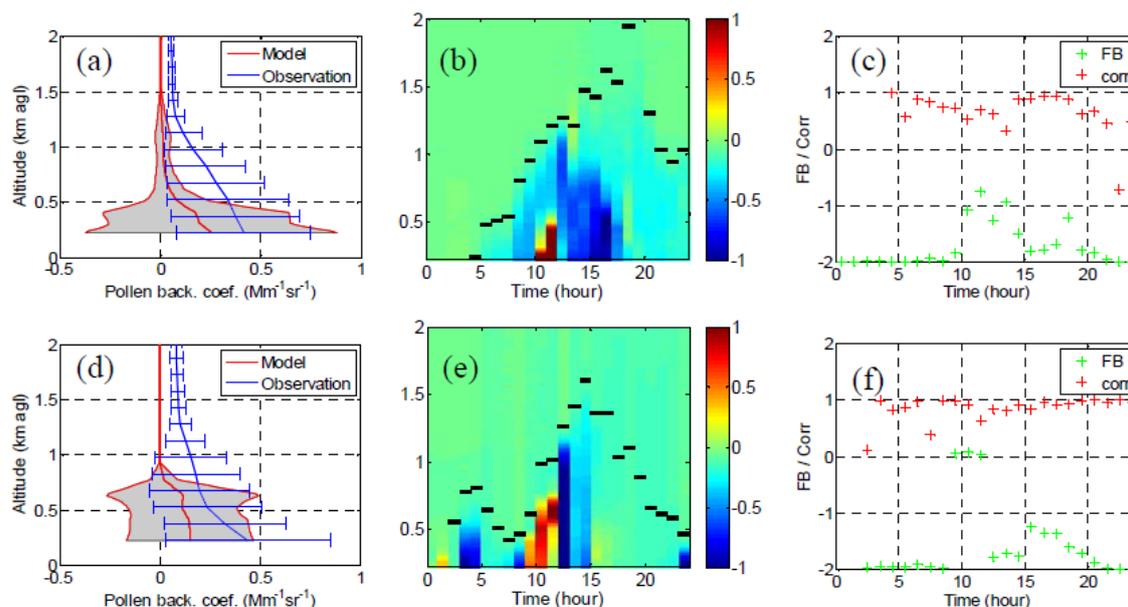


Ilustración 10: Coeficiente de retrodispersión del polen promediado diariamente (\pm desviación estándar) en (a) 27M y (d) 29M; Diferencia horaria (Mm⁻¹sr⁻¹) en (b) 27M y (e) 29M. (h_{pol} está representado mediante rayas negras horizontales); Sesgo fraccional (fractional bias) (FB) y coeficiente de correlación (Corr) horarios en (c) 27M y (f) 29M.

Un primer resultado es el buen rendimiento del modelo para reproducir la forma de los perfiles verticales (en general). Aunque el promedio diario de β_{pol}^{mod} cae en ambos casos en la desviación estándar de β_{pol}^{obs} , parece que está siendo muy subestimado en todas las alturas. La evolución temporal de su diferencia horaria muestra que las subestimaciones más fuertes ocurren en la tarde. En ambos días también se aprecian algunas sobreestimaciones alrededor de las 10:00 en alturas inferiores a 0,75 km. El 29M, esta sobreestimación se compensa ($FB \approx 0$) con la subestimación del modelo por encima de 0,75 km. Durante la noche del 29 M (antes de las 06:00) las capas de polen observadas por debajo de 0,8 km no están reproducidas en absoluto por el modelo. Se contemplan varias líneas de investigación para mejorar estas primeras simulaciones: (i) completar la información sobre distribución de los árboles, (ii) mejorar el esquema de emisión y hacerlo dependiente del tiempo, (iii) estudiar la sensibilidad del modelo al tamaño del polen, (iv) identificar los mecanismos responsables del transporte de polen durante la noche, (v) estudiar el impacto de los cambios en los regímenes de brisa tierra-mar en la concentración en el suelo y en la columna atmosférica.

3.6. Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto Aerosols, Clouds, and Trace Gases Research Infrastructure Network (ACTRIS-2) (grant agreement nº 654109) del programa H2020 de la Unión Europea; por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER (proyecto TEC2015-63832-P); por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (red temática CGL2017-90884-REDT); la Unidad de Excelencia María de Maeztu (MDM-2016-0600) está financiada por la Agencia Estatal de Investigación.

3.7. Bibliografía

- [1] Nathan, R., Meltzer, E., Selner, J., and Storms, W.: Prevalence of allergenic rhinitis in the United States, *J. Allergy Clin. Imm.*, 99, 808–814, 1997.
- [2] WHO (World Health Organization), Phenology and human health: allergic disorders, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 55 pp., 2003.
- [3] Beggs, P. J.: Impacts of climate change on aeroallergens: past and future, *Clin. Exp. Allergy*, 34, 1507–1513, 2004.
- [4] D’Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T., and van Cauwenber, P.: Allergenic pollen and pollen allergy in Europe, *Allergy*, 62, 976–990, 2007.
- [5] Veriankanité, L., Siljamo, P., Sofiev, M., Šauliene, I., and Kukkonen, J.: Modeling analysis of source regions of long-range transported birch pollen that influences allergenic seasons in Lithuania, *Aerobiologia*, 26, 47–62, 2010.
- [6] Sofiev, M., Siljamo, P., Ranta, H., Linkosalo, T., Jaeger, S., Rasmussen, A., Rantio-Lehtimäki, A., Severova, E., and Kukkonen, J.: A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Description of the emission module, *Int. J. Biometeorol.*, 57, 45–58, doi: 10.1007/s00484-012-0532-z, 2013.
- [7] Zhang, R., Duhl, T., Salam, M.T., House, J.M., Flagan, R. C., Avol, E.L., Gilliland, F.D., Guenther, A., Chung, S. H., Lamb, B.K., and VanReken, T.M., Development of a regional-scale pollen emission and transport modeling framework for investigating the impact of climate change on allergic airway disease, *Biogeosciences* 11, 1461–1478, doi:10.5194/bg-11-1461-2014, 2014.
- [8] M. Sicard, R. Izquierdo, M. Alarcón, J. Belmonte, A. Comerón, J. M. Baldasano, Near-surface and columnar measurements with a micro pulse lidar of atmospheric pollen in Barcelona, Spain, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, issue 11, pp. 6805–6821, doi: 10.5194/acp-16-6805-2016, 2016.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [9] M. Sicard, R. Izquierdo, O. Jorba, M. Alarcón, J. Belmonte, A. Comerón, J.M. Baldasano, Atmospheric dispersion of airborne pollen evidenced by near-surface and columnar measurements in Barcelona, Spain, Proc. SPIE 10001, 100010L, A. Comerón, E. I. Kassianov, K. Schäfer, J. W. Jack, R. H. Picard, K. Weber (Ed.), SPIE, Washington (EE.UU.), doi: 10.1117/12.2244517, Edinburgh, United Kingdom, 26 – 29 September 2016.
- [10] Flynn, C. J., Mendoza, A., Zheng, Y., and Mathur, S., “Novel polarization- sensitive micropulse lidar measurement technique”, Optics Express 15(6), 2785-2790 (2007).
- [11] Shimizu, A., Sugimoto, N., Matsui, I., Arao, K., Uno, I., Murayama, T., Kagawa, N., Aoki, K., Uchiyama, A., and Yamazaki, A.: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE- Asia, J. Geophys. Res., 109, D19S17, doi: 10.1029/2002JD003253, 2004.
- [12] Pérez, C., Haustein, K., Janjic, Z., Jorba, O., Huneus, N., Baldasano, J. M., Black, T., Basart, S., Nickovic, S., and Miller, R.L., “Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1: Model description, annual simulations and evaluation”, Atmospheric Chemistry and Physics 11, 13001–13027 (2011).
- [13] Jorba, O., Dabdub, D., Blaszcak-Boxe, C., Pérez, C., Janjic, Z., Baldasano, J. M., Spada, M., Badia, A., and Gonçalves, M., “Potential significance of photoexcited NO₂ on global air quality with the NMMB/BSC chemical transport model”, Journal of Geophysical Research 117(D13301), 1-16 (2012).
- [14] Williams, C.G., “Conifer reproductive biology. Springer”, New York, 167 pp. (2009).
- [15] Bricchi, E., Frenguelli, G., Mincigrucci, G., “Experimental results about Platanus pollen deposition”, Aerobiologia 16, 347–352 (2000).
- [16] Jackson, S.T., and Lyford, M.E., “Pollen Dispersal Models in Quaternary Plant Ecology: Assumptions, Parameters, and Prescriptions”, The Botanical Review 65(1), 39-75 (1999).
- [17] Pérez, C., Nickovic, S., Baldasano, J. M., Sicard, M., Rocadenbosch, F., and Cachorro, V. E.: A long Saharan dust event over the western Mediterranean: Lidar, sun photometer observations, and regional dust modeling, J. Geophys. Res., 111, D15214, doi:10.1029/2005JD006579, 2006.

4. USOS Y SERVICIOS DEL SATÉLITE ESPAÑOL PAZ SAR ASOCIADOS A LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL TERRITORIO

Victoriano Moreno Burgos y Daniel Carrasco Díaz. HISDESAT

4.1. La misión PAZ

El satélite PAZ de Hisdesat es el primero de Observación de la Tierra en España incluido en el PNOTS (Programa Nacional de OT por satélite).

Se lanzó el 22 de febrero de 2018 a bordo de un cohete Falcon 9, desde la Base Aérea de Vandenberg (California).

PAZ lleva a bordo un sensor SAR de alta tecnología y muy alta resolución con capacidad de posicionamiento por debajo del metro.

PAZ cubre las necesidades de seguridad y defensa y otras de carácter civil, pudiendo tomar más de 100 imágenes diarias de hasta 25 cm de resolución, tanto diurnas como nocturnas, y con independencia de las condiciones meteorológicas.

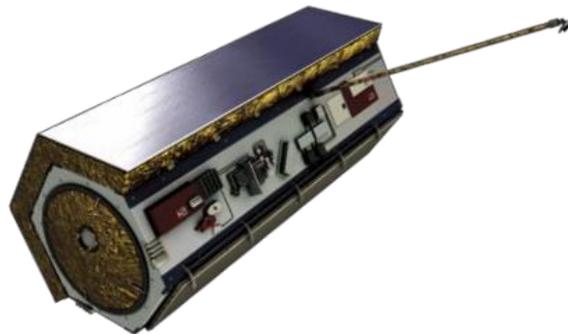


Ilustración 11: Representación del satélite PAZ.

4.2. Características

- El satélite vuela a una altitud de 514 km en una órbita helio- síncrona, con un ciclo de repetición de 11 días (reducido a 4 o 7 días cuando opera en constelación).
- Las imágenes tienen una elevada exactitud de geolocalización, por debajo de 1 metro de resolución.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Es el primero que incorpora un receptor AIS, que permite fusionar las imágenes radar con datos AIS simultáneos para aplicaciones de seguridad marítima.
- PAZ puede operar en diferentes modos de imagen con resolución y tamaños flexibles.

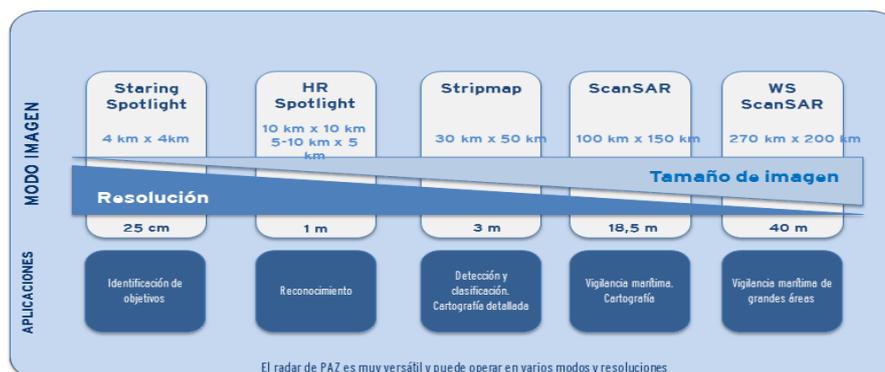


Ilustración 12: Modos de toma y resoluciones de imágenes del satélite paz

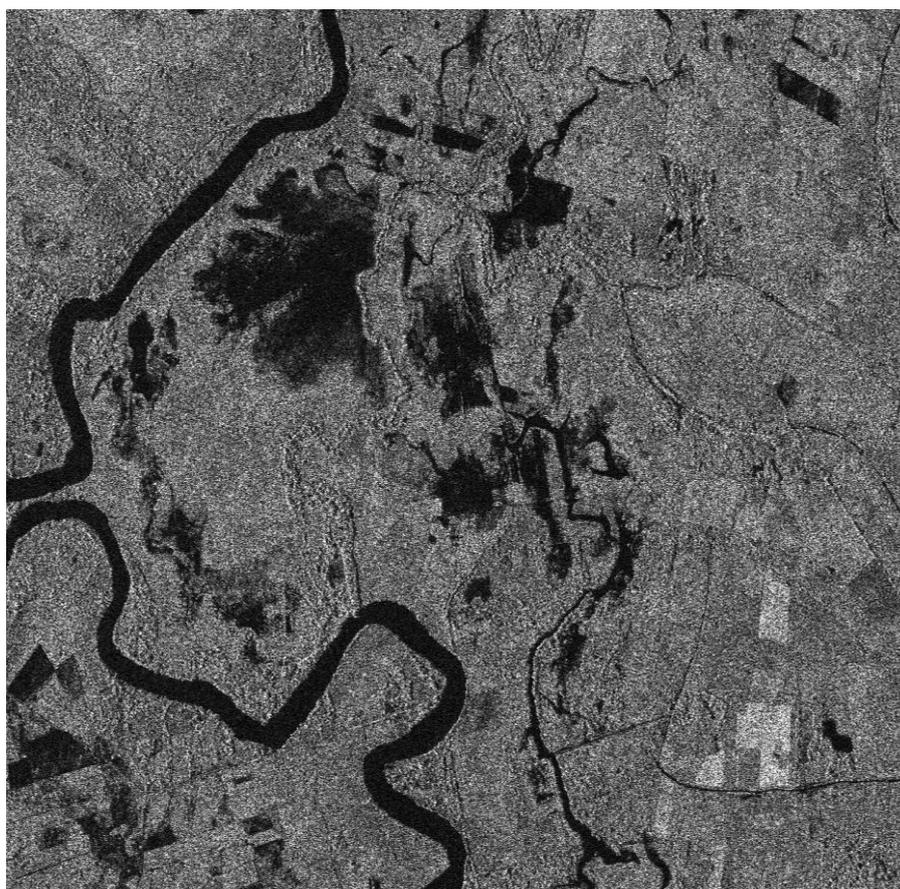


Ilustración 13: Ejemplo de una imagen SAR PAZ en un entorno agrícola. © Hisdesat.

4.3. Los servicios del satélite PAZ

El satélite PAZ está dotado de una tecnología muy avanzada que permite proporcionar información en todo momento y de cualquier parte de la superficie de la Tierra. Esto hace que proporcione servicios orientados a la gestión del territorio, gestión medioambiental, situaciones de emergencia/riesgos, labores humanitarias, inteligencia, etc.

4.3.1. Vigilancia marítima

Las áreas marítimas abarcan un 71% de la superficie de la Tierra y comprenden el 90% del comercio mundial. La monitorización continua de las rutas marítimas se ha convertido en una prioridad para muchas organizaciones nacionales e internacionales. Estas rutas constituyen la base de un comercio global y se utilizan para el transporte de todo tipo de mercancías, algunas de ellas peligrosas.

Los vertidos de crudo en el mar, debidos a accidentes o prácticas inadecuadas, dañan de manera dramática la fauna marina, las actividades pesqueras y los entornos costeros,

4.3.2. Descripción del servicio

La monitorización del tráfico marítimo, la detección de vertidos de crudo de las embarcaciones, la desconexión fraudulenta de los sistemas AIS, la pesca ilegal, la protección de los restos arqueológicos submarinos y la detección patrones de comportamiento anómalos de embarcaciones como indicador de posibles actividades ilícitas.

4.3.3. Beneficios

Ejercer plenamente la soberanía sobre la Zona Económica Exclusiva. Un uso más eficiente de los recursos de vigilancia marítima (como aviones y patrulleras) contra las actividades ilegales, que ahora se realiza con la información por satélite. Además de la capacidad de vigilancia, el servicio proporciona información pericial válida contra los infractores y a largo plazo genera un factor disuasorio contra las citadas actividades ilegales.

4.3.4. Clientes

Las agencias de seguridad marítima, compañías de gas y petroleras con operaciones en alta mar, agencias de defensa, etc.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

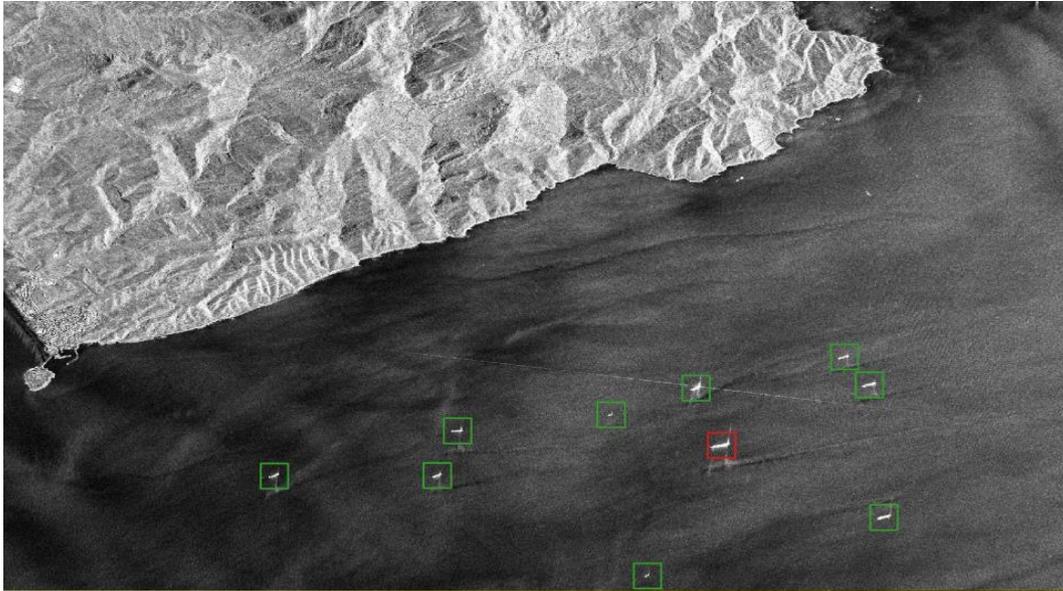


Ilustración 14: Ejemplo de barcos detectados en imagen SAR. Imagen PAZ © Hisdesat

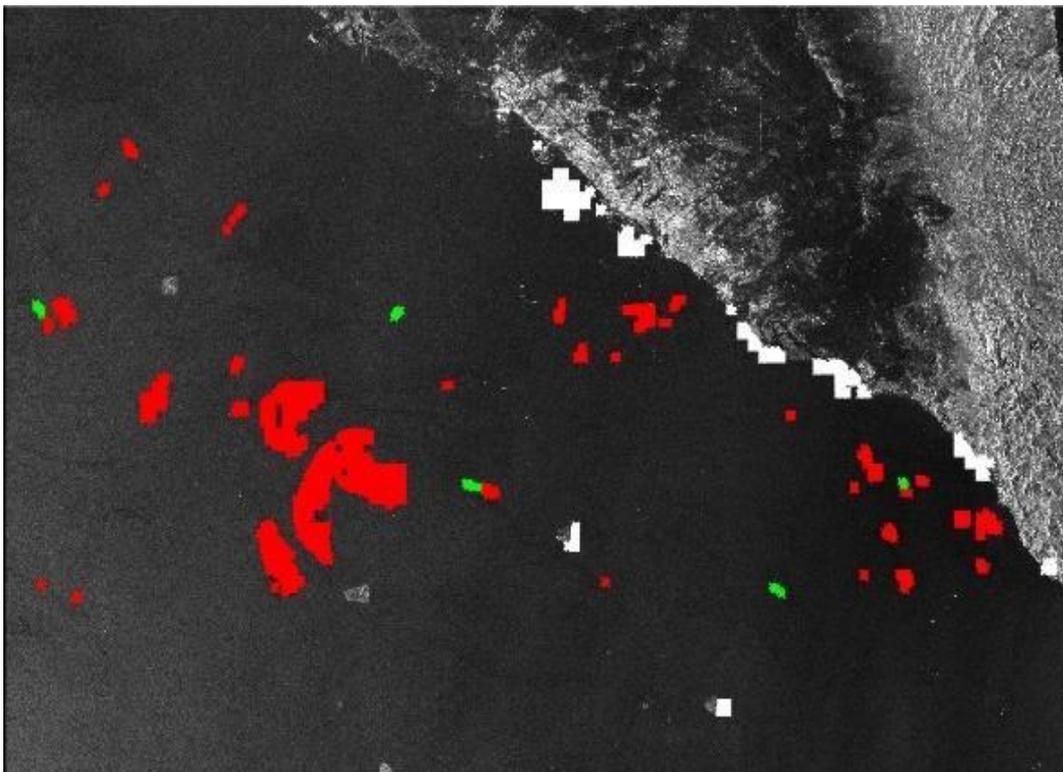


Ilustración 15: Ejemplo de manchas de petróleo detectadas en la imagen SAR

4.4. Defensa y seguridad

Proporcionar la información adecuada y las herramientas de decisión a los responsables de la toma de decisiones en entornos de seguridad y defensa para anticipar y responder a las misiones y actividades específicas.

4.4.1. Descripción del servicio

Detección recurrente y automática de cambios sobre objetivos predefinidos. Generación de información GEOINT y/o IMINT, en todas las condiciones meteorológicas. Apoyo en misiones internacionales, protección de fronteras, verificación de tratados internacionales, etc.

4.4.2. Beneficios

Gracias a no tener restricciones meteorológicas, los datos radar son una fuente valiosa para la detección de cambios y el reconocimiento del terreno, facilitando autonomía para la toma de decisiones en entornos cambiantes. Los datos radar también son útiles como ayuda para la preparación de escenarios, la identificación de rutas de evacuación, el estudio de transitabilidad y vulnerabilidad, y obviamente, también para la formación de personal militar y la generación de simulaciones.

4.4.3. Clientes

Agencias de Defensa, Organizaciones Internacionales, etc.

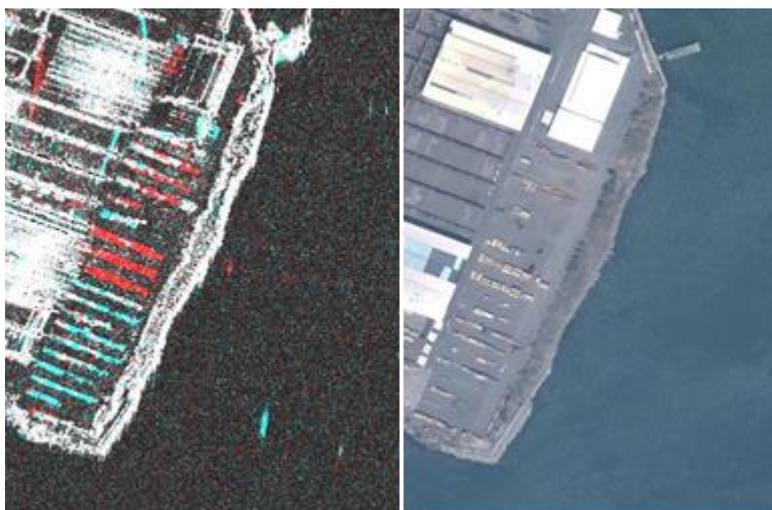


Ilustración 16: Ejemplo de detección de cambios en zona portuaria.

4.5. Ordenación del territorio, ingeniería civil e infraestructuras

Proyectos de ingeniería que requieren monitorización durante las fases de diseño, construcción y operación. Incluye análisis de estabilidad del terreno, seguimiento del trabajo en curso, etc.

4.5.1. Descripción del servicio

Medida de alta resolución de la deformación del terreno en obras de construcción o infraestructuras críticas como puentes, oleoductos, gasoductos, presas, etc., y en general en áreas urbanas afectadas por procesos naturales o provocados por el hombre (construcción de túneles, explotación de acuíferos, procesos kársticos, etc.). Medida de la velocidad de deformación del terreno a nivel de milímetros anuales. Monitorización de trabajos en curso, especialmente en áreas remotas.

4.5.2. Beneficios

Medida de la deformación del terreno, como complemento de medidas in situ. Evaluación de riesgos estructurales en infraestructuras y análisis histórico de explotación en infraestructuras extractivas. Vigilancia no cooperativa. Análisis forense.

4.5.3. Clientes

Compañías de ingeniería civil y minería, operadores de transporte ferroviario, etc.

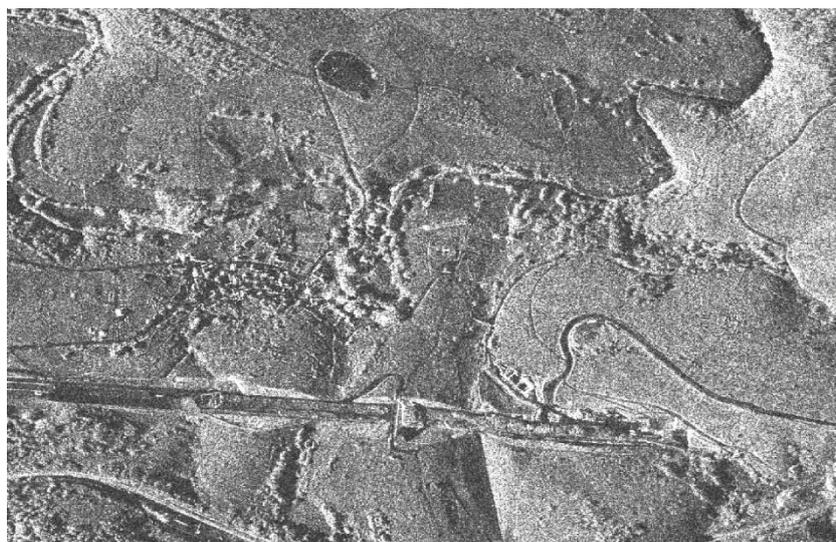


Ilustración 17: Ejemplo de construcción de línea ferroviaria de AVE. Imagen PAZ © Hisdesat

4.6. Riesgos y emergencias

Los riesgos y las emergencias requieren una respuesta rápida planificada de antemano.

Las imágenes radar de alta resolución proporcionan información actualizada y relevante para monitorizar áreas concretas con evaluaciones de alcance de daños provocados por fenómenos como inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas y desastres antrópicos.

4.6.1. Descripción del servicio

Proporciona conocimiento del territorio antes del desastre y la evaluación del impacto del mismo y su extensión. Información sobre deformación del terreno producida por procesos sísmicos, volcánicos, kársticos, excavaciones, corrimientos de tierra, etc.

4.6.2. Beneficios

Evaluación rápida de la extensión de los daños durante la emergencia. Especialmente adecuado para los mapas de inundaciones por la capacidad de observar a través de las nubes. Medida de deformación del terreno de alta resolución para la gestión de riesgos geológicos.



Ilustración 18: Ejemplo de zonas inundadas en la región de Málaga. Imagen PAZ © Hisdesat.

4.6.3. Clientes

Instituciones gubernamentales (equipos de respuesta a emergencias y protección civil), compañías de seguros y reaseguros, etc.

4.7. Vigilancia medioambiental

De acuerdo con la FAO, el área forestal global se redujo en torno a 3,3 millones de hectáreas anualmente (2010-2015), especialmente en las zonas tropicales. Muchas veces, el proceso de deforestación se asocia a actividades irregulares que sólo pueden detectarse, mitigarse y prevenirse con observación recurrente a través del uso de imágenes radar de alta resolución.

4.7.1. Descripción del servicio

La monitorización recurrente de grandes áreas forestales para detectar los procesos de deforestación en los momentos iniciales, así como las potenciales actividades ilegales asociadas, tales como minería ilegal, explotación forestal no autorizada, tala selectiva, cultivos ilícitos, asentamientos ilegales, etc.

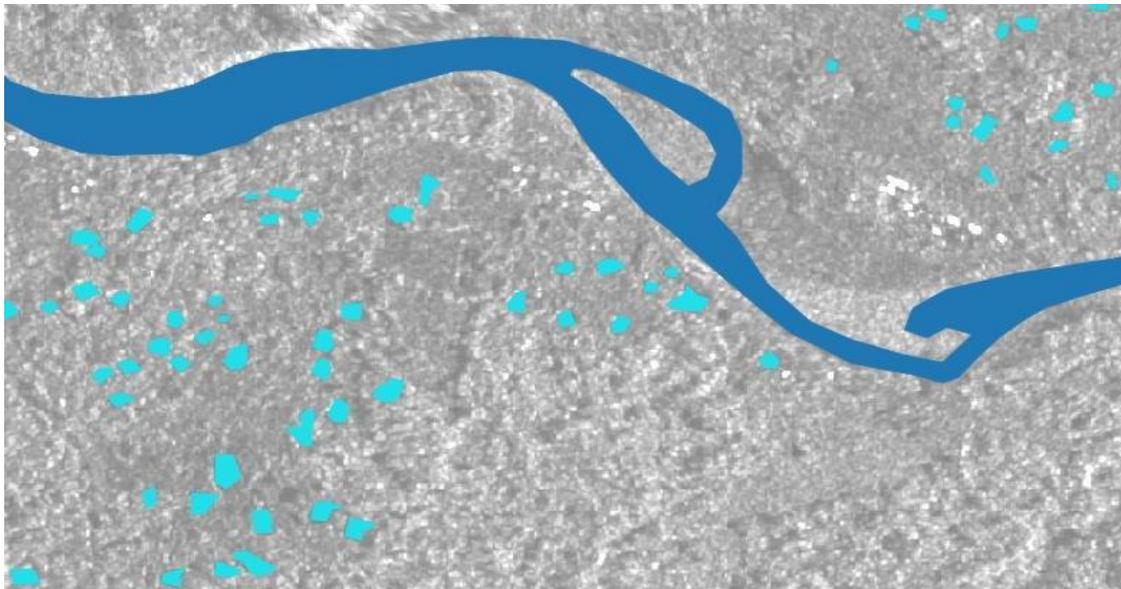


Ilustración 19: Ejemplo de identificación de piscinas para lavar mineral de oro en una zona selvática. © Hisdesat.

4.7.2. Beneficios

Detección temprana de actividades ilegales en áreas forestales, que podrían dar lugar a deforestación a gran escala, daños medioambientales o actividades ilegales. La disponibilidad

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

del servicio es independientemente de la meteorología. Refuerzo de la presencia del Estado en regiones remotas. Importante elemento disuasorio.

4.7.3. Clientes

Instituciones gubernamentales responsables de la protección forestal, bien sea desde una perspectiva medioambiental (lucha contra la deforestación en general) o desde el punto de vista de seguridad (lucha contra las actividades ilegales como minería, contrabando, tráfico de drogas, etc.). Compañías con derechos de explotación en grandes áreas forestales, que necesitan información sobre posible intrusismo.

5. TECNOLOGÍAS DE CONECTIVIDAD PARA APLICACIONES DE MONITORIZACIÓN AMBIENTAL. TECNOLOGÍAS LPWAN

Jorge del Valle Arias

5.1. Resumen

Los proyectos de monitorización y control medioambiental tienen unas características que determinan la tecnología de conectividad más conveniente para estas aplicaciones. Se revisa la arquitectura típica de una aplicación IoT, y se resumen las principales tecnologías de bajo consumo energético y largo alcance, denominadas tecnologías LPWAN (Low Power Wide Area Network) más habituales para este tipo de aplicaciones.

5.2. El internet de las cosas y el medio ambiente

El IoT está llamado a revolucionar, si no lo está haciendo ya, la forma en que pensamos acerca de los dispositivos electrónicos y su potencial para incrementar la eficiencia de los negocios.

Millones de dispositivos, de “cosas” conectadas, envían datos, vía Internet, a plataformas en las que el procesamiento de la información masiva (Big-Data) generará información de ayuda a la toma de decisiones.

El Internet de las Cosas nos ofrece la visión de un mundo en el que prácticamente sobre cualquier objeto se pueda medir algún parámetro y ese dato sea enviado a Internet. Esto significa miles de millones de objetos enviando información. La verdadera potencia no está tanto en el hecho de que cualquier objeto genere datos, sino en la capacidad de extracción de información de esa ingente cantidad de datos mediante algoritmos de correlación e inteligencia artificial. En definitiva, lo que perseguimos es que toda esa información nos ayude a tomar mejores decisiones. Es decir, el IoT es la herramienta necesaria para que los sistemas de ayuda a la toma de decisiones funcionen mejor.

El IoT puede ser cualquier cosa, cualquier objeto de nuestro alrededor puede ser un objeto conectado: un sensor de temperatura, un sensor de localización, un dispositivo que mida la humedad de la tierra de las plantas en casa, un circuito que monitorice la vibración de un viaducto en una carretera, etc.

Para que todos esos datos puedan ser de utilidad, los sistemas IoT deben ser capaces de hacer llegar la información al lugar adecuado: a las plataformas IoT.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Ejemplos de uso del IoT en monitorización y control medioambiental hay muchos; por citar sólo algunos:

Coche Conectado

Vehículos inteligentes, autónomos e interconectados entre sí, que se comunican y procesan lo que otros coches van a hacer, de modo que el tráfico se pueda mover a una velocidad uniforme, reduciendo la ineficiencia del combustible que causan los cambios de velocidad y de marcha cuando conducimos.

Fauna Conectada

Seguimiento de especies en peligro de extinción (ej: lince ibérico), para rastrear dónde está.

Edificios Inteligentes

Edificios Inteligentes, que optimizan el consumo energético (luces, calefacción), mediante sensores y controles remotos.

Monitorización Ambiental

Sensores de calidad del aire en ciudades que generan alertas por contaminación.

Monitorización de cauces fluviales y cuencas hidrográficas para alertas de crecidas o para gestión de la calidad del agua

Agricultura Inteligente

Uso de sensores en el suelo, en la planta o midiendo el clima, para determinar cuándo y en qué cantidad es necesario regar (optimización del agua) o cuál es el mejor momento para tratar una enfermedad del cultivo (predicción de plagas y hongos), optimizando el uso de pesticidas y fitosanitarios.

Detección Incendios

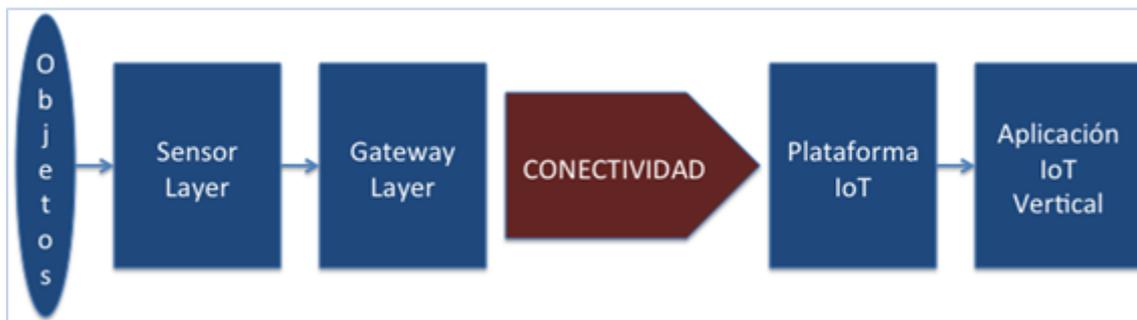
Detección temprana de incendios mediante redes de sensores de humedad y temperatura y/o técnicas de visión artificial.

Gestión de Residuos

Optimizar la gestión de recogida de residuos con contenedores inteligentes, con sensores que avisan de cuándo es necesario vaciarlos, optimizando las rutas de los vehículos de recogida.

5.3. Arquitectura de una solución IOT. Conectividad

Sea cual sea la aplicación vertical de un sistema IoT, la arquitectura común será muy parecida a ésta:



Los objetos que se desean conectar se monitorizan (miden) por medio de sensores que generan datos. Los datos, que son la información de los “objetos conectados”, se hacen llegar a través de un gateway o pasarela, y por medio de una capa de conectividad, hasta una plataforma IoT en la que se gestionan esos datos y se preparan para su posterior procesamiento y/o visualización, así como para el acceso por parte de su usuario final.

La capa de conectividad a usar en cada proyecto vendrá definida por los siguientes parámetros:

- **Ancho de banda** necesario.

No será igual enviar datos de una cámara IP, que necesita gran ancho de banda, que información de la humedad del suelo en aplicaciones de agricultura inteligente (Smart Agro), cuyo contenido será sólo de un valor numérico.

- **Frecuencia** de envío de datos.

Supongamos una aplicación industrial de monitorización del nivel de gases tóxicos e inflamables en el interior de una cámara de pintura en una fábrica de coches. La información se necesita en tiempo real o casi-real, digamos una medida cada 5 segundos. En caso contrario, el sistema podría no identificar una fuga de gases como situación de peligro de manera inmediata.

En cambio, siguiendo con el ejemplo de Smart Agro, el perfil de humedad del suelo no varía rápidamente, y aunque lo hiciera, por ejemplo por la rotura de una tubería de riego, su influencia sobre el cultivo no es crítica de manera inmediata como para ser necesaria una identificación inmediata. Bastaría con informar sobre la humedad del suelo cada 15-20 minutos.

- **Latencia.**

La latencia (nos hartaremos de oír este concepto con la llegada de las redes 5G) se define como el tiempo que tarda en llegar la información a su destino (a la plataforma IoT) desde que salió del origen (el sensor).

Siguiendo con el ejemplo de la cámara de pintura, en el momento en que se produjera un nivel de gases peligroso, esa información debe llegar inmediatamente a la plataforma IoT para generar las acciones de alerta oportunas.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En cambio, en la aplicación de Smart Agro, el valor de la humedad del suelo puede tardar unos segundos en llegar a la plataforma, puesto que su procesamiento y acción desencadenada no es necesario que sea inmediata.

Tres parámetros definen la capa de conectividad:

- Ancho de Banda
- Frecuencia de Transmisión
- Latencia

El análisis de estos tres parámetros definirá un primer filtro de tecnologías de conectividad a usar, que acabará de definirse con los siguientes factores de clasificación:

- Conexión cableada vs. Inalámbricas
- Conexión de corto alcance vs. largo alcance
- Frecuencia licenciada vs. Frecuencia de uso libre

En el siguiente gráfico se muestran las opciones de conectividad inalámbrica disponibles actualmente.

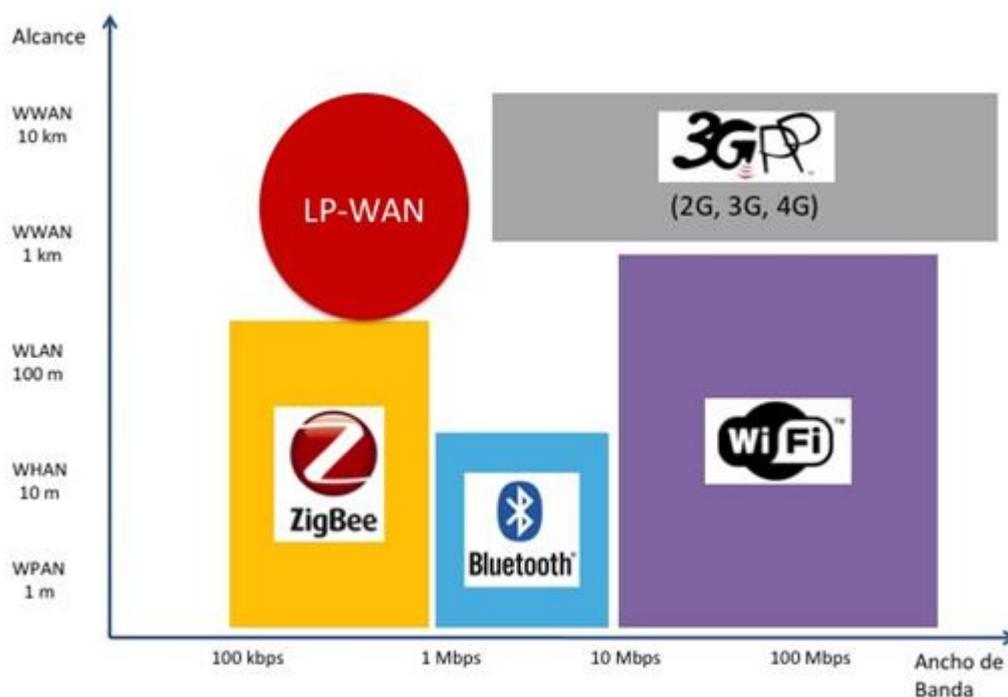


Ilustración 20: Posicionamiento de Tecnologías de Conectividad por ancho de banda / alcance.

5.4. Redes LPWAN

En comparación con las redes celulares, las redes LPWAN son más eficientes en consumo energético y tienen un alcance mayor; permiten transmitir pequeñas cantidades de datos (por cada dispositivo u objeto conectado) a un bajo coste.

De alguna forma, las redes LPWAN vienen a cubrir los factores que considero críticos para la masiva adopción del IoT:

- La ubicuidad: cobertura en todo momento y en cualquier lugar
- El bajo coste
- El bajo consumo energético

Las redes LPWAN son perfectas para casos de uso en los que haya muchos “objetos” pequeños y de bajo coste que tengan que enviar periódicamente pequeñas cantidades de datos.

En los próximos epígrafes se analizarán 5 tecnologías LPWAN: Ingenu, LoRa, Sigfox, LTE-M1 y NB-IoT.

A priori debemos decir que ninguna tecnología cubrirá todas las aplicaciones verticales del IoT; cada una tendrá su hueco.

De forma general, los factores más importantes a analizar de cada tecnología LPWAN son:

- Arquitectura de red sencilla
- Cobertura de largo alcance
- Bajo consumo energético
- Robustez frente a interferencias
- Capacidad de la red (en número máximo de dispositivos)
- Seguridad

INGENU



Ingenu es una empresa de California que ha desarrollado su propia topología de comunicaciones IoT, con ambición de alcanzar un despliegue global. La red Ingenu utiliza una tecnología propietaria denominada RPMA (Random Phased Multiple Access), que según la propia empresa está optimizada para aplicaciones de bajo consumo energético y amplia cobertura, con una infraestructura de red reducida. Esta red opera en la banda de 2,4 GHz.

Los beneficios de la red son:

- Largo alcance. Según Ingenu, la tecnología RPMA necesita un 95% menos infraestructura (nodos de red) que LoRa, y 98% menos nodos que Sigfox.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Frecuencia de operación única en todo el mundo, en banda 2,4 GHz.
- Autonomía. Los dispositivos pueden estar alimentados por batería con una autonomía de hasta 20 años, según el caso de uso.
- Capacidad. La infraestructura RPMA puede soportar grandes cantidades de datos.

Ingenu tiene red desplegada en unas 35-40 ciudades de EEUU (debajo se muestra el mapa de cobertura).



Ilustración 21: Despliegues de Ingenu en USA.

LORA



LoRa o LoRaWAN (www.lora-alliance.org) es una red LPWAN definida para uso en aplicaciones inalámbricas IoT en redes regionales o globales. El caso de uso ideal de LoRa implica pequeños dispositivos industriales que transmiten pequeñas cantidades de datos con poca frecuencia de envío, y que se mueven en un área determinada en el que hay desplegada una infraestructura LoRa.

Los beneficios de LoRa, según la propia LoRa Alliance, incluyen:

- Protocolo abierto. LoRa es una especificación, lo que significa que cualquier empresa puede desarrollar su propia infraestructura LoRa (previo pago de la licencia oportuna).
- Largo alcance. La denominación LoRa viene de Long Range; la especificación está diseñada para transmitir datos a largas distancias, limitado la cantidad de información que se puede enviar.
- Baja potencia. LoRa transmite utilizando ráfagas de muy poca potencia. Esto tiene reflejo

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

positivo en la autonomía de las baterías para alimentar a los dispositivos.

- Coste

La arquitectura de red de LoRa está basada en una topología en estrella, en la que los gateways enrutan los datos entre los dispositivos finales (nodos) y el servidor de red. Los gateways se conectan al servidor de red por medio de conexiones IP, y actúan como pasarelas transparentes, convirtiendo los paquetes RF en paquetes IP y viceversa

En la siguiente imagen se muestra la arquitectura física y lógica:

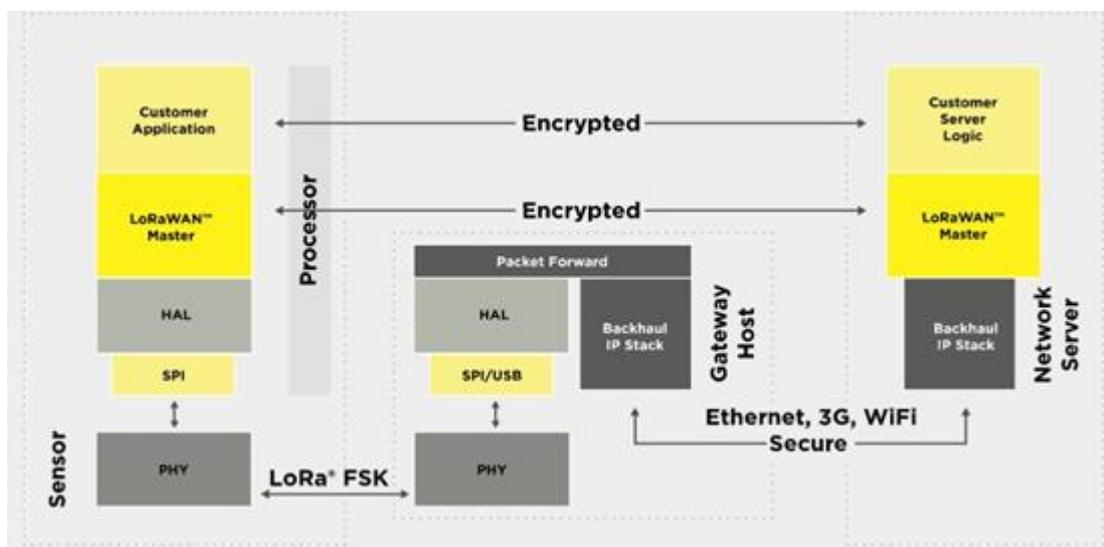


Ilustración 22: Arquitectura física y lógica de LoRa

LoRa permite tasas binarias entre 0,3 kbps y 50 kbps. Son anchos de banda bajos, pero suficientes para aplicaciones que no sean críticas en latencia y que generen datos de poco volumen y con poca periodicidad.

Según la Lora Alliance, cuentan con 83 operadores de red que han desplegado redes locales en 49 países (datos de julio-2018).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



Ilustración 23: Países donde hay operadores locales de LoRa

En España el despliegue lo está llevando a cabo The Things Network Foundation (www.thethingsnetwork.org), donde hay desplegados 155 gateways, con la distribución geográfica que se indica en la siguiente imagen:



Ilustración 24: Gateways LoRa en España.

Aunque haya redes locales ya desplegadas, cualquier usuario puede desplegar su propia red LoRa. Esta es una de las características que le diferencia de Sigfox, que se analizará a continuación. Teniendo casos de uso muy parecidos, LoRa permite montar a un operador su propia red.

SIGFOX

Sigfox es una tecnología propietaria creada y distribuida por la empresa francesa del mismo nombre. Opera en banda no licenciada (868 MHz y 915 MHz), ocupando un espectro de 192 KHz. Ofrece tasas binarias muy bajas con largo alcance y gran autonomía de los dispositivos alimentados por batería. Se establecen 4 zonas en el mundo, que definen la banda de frecuencias a utilizar y la máxima potencia de transmisión que puede tener un dispositivo Sigfox.

Radio zones

- RZ1: Europe, MEA
868 MHz, +14 dBm
- RZ2: North America, Brazil
902 MHz, +22 dBm
- RZ3: Japan, Korea
920 MHz, +14 dBm, LBT
- RZ4: South America
920 MHz, +22 dBm



Ilustración 25: Bandas de frecuencia Sigfox por zona.

Sigfox tiene actualmente su red desplegada en +45 países, por medio de acuerdos locales en cada país con operadores para construir su red, o bien con filiales de la propia empresa matriz. En España ha desplegado su red por medio de un acuerdo estratégico con [Cellnex](#), instalando gateways en las torres de esta empresa de gestión de infraestructuras, y tienen una cobertura, según datos del mes de julio de 2018, del 95% de la población y algo más del 70% del territorio. Esa es una de sus ventajas importantes: es una red global, en la que los nodos funcionan de la misma manera en toda la red (siempre que la red use la misma banda de frecuencias. Es decir, un nodo que opere en Europa, en banda 868 MHz, no podrá conectarse a una red en banda 915 MHz). El siguiente gráfico muestra los países con cobertura (julio-2018):

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



Ilustración 26: Países con cobertura Sigfox (julio 2018).

Sigfox soporta mensajes de sólo 12 bytes en el enlace ascendente (uplink), y de 8 bytes en el downlink. En cuanto a conectividad, Sigfox tiene 4 esquemas de conexión, según el número de mensajes que permiten al día y la bi-direccionalidad. El esquema de conexión de mayor nivel permite 140 mensajes al día.

Con una arquitectura de red en estrella, utiliza una modulación de banda ultra- estrecha, donde cada mensaje se envía en portadoras de tan sólo 100 Hz a una tasa binaria de hasta 600 bps. De este modo Sigfox consigue largas distancias de cobertura con una modulación muy robusta contra el ruido, con un balance de enlace de hasta 163 dB. El uso de una banda tan estrecha permite que la señal sea recibida por las estaciones base incluso con una relación SNR de 8 dB.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

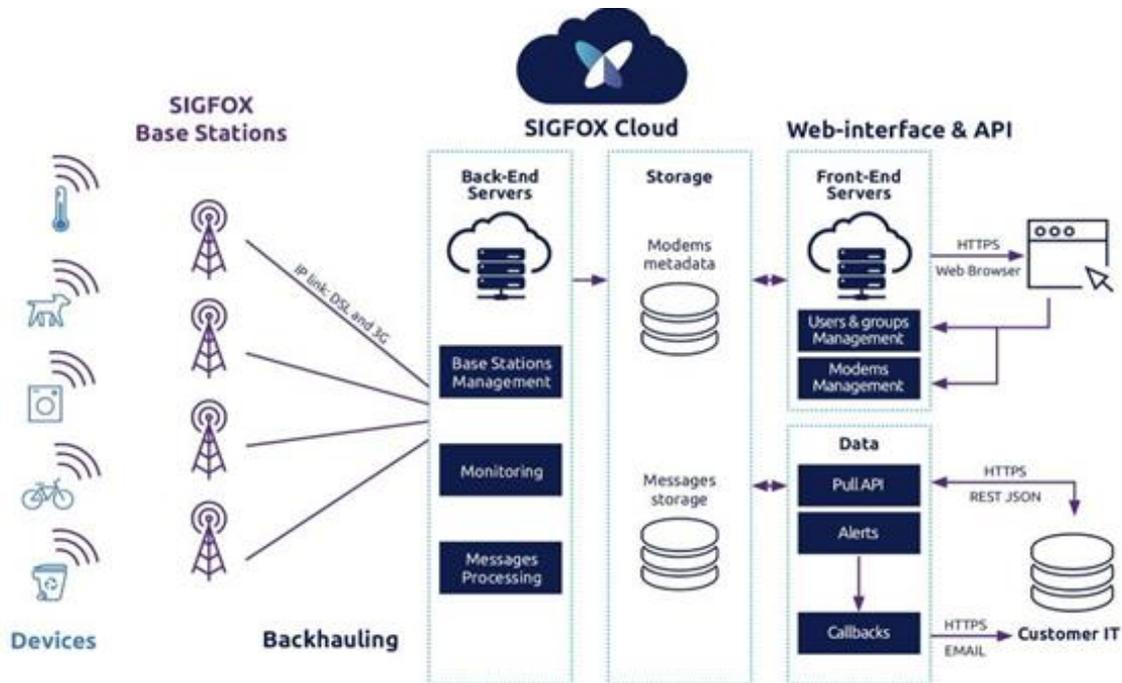


Ilustración 27: Arquitectura de la Red Sigfox.

El acceso al interfaz radio se hace por medio de un mecanismo asíncrono y aleatorio. Cuando un dispositivo tiene que enviar un mensaje, lo hace en una frecuencia aleatoria (dentro de la banda que usa esta tecnología), y envía dos réplicas en diferentes frecuencias y momentos. Este mecanismo se denomina diversidad en el tiempo y en la frecuencia, se indica en la siguiente imagen:

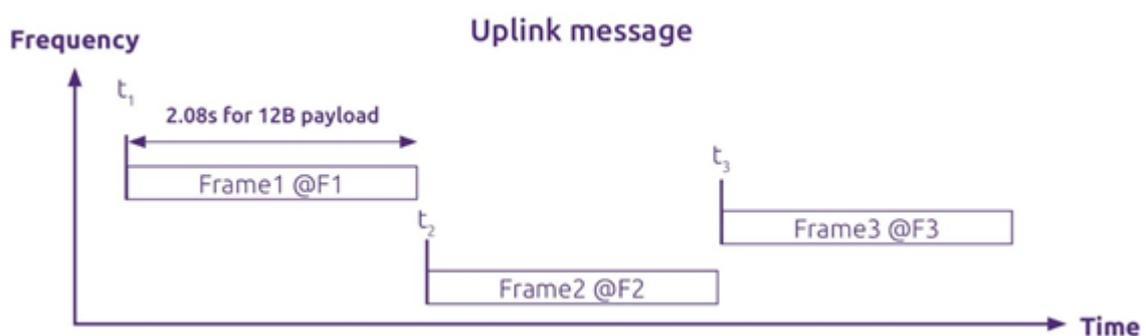


Ilustración 28: Diversidad en el tiempo y la frecuencia.

Localización

Sigfox es la única red LPWAN que integra un algoritmo de localización geográfica del dispositivo sin necesidad de usar un GPS externo. Esta funcionalidad, denominada Sigfox Atlas, es especialmente interesante para casos de uso basados en trazabilidad de activos, en los que no se requiera gran precisión en la localización. La precisión de este algoritmo es de unos 5 km

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

en zonas rurales, con pocas estaciones base Sigfox, y mejora hasta los 500 metros en zonas con mayor densidad de estaciones base.

La localización Sigfox se basa en el cálculo a partir del nivel de señal recibido (RSSI) de cada estación base, mediante algoritmos de triangulación.

Si además se habilita la localización Wi-Fi, la precisión puede alcanzar los 50 metros en zonas en las que el nodo Sigfox “escuche” a varias redes Wi-Fi a su alrededor.

LTE-M

LTE-M

LTE-M es el estándar definido por el 3GPP para redes LPWAN, específicamente definido para aplicaciones IoT, mediante dispositivos con baja complejidad que proporciona largo alcance, utilizando para ello las redes 4G (LTE) de los operadores.

Las redes LTE-M coexisten con las redes celulares tradicionales 2G, 3G y 4G, y se benefician de ellas de su cobertura global y funcionalidades de seguridad (identificación de usuario, autenticación, integridad de datos, etc.).

Las ventajas de LTE-M son:

- Soporte de los operadores de redes móviles. Esta tecnología se despliega sobre la misma red que ya tenga un operador que opte por esta tecnología.
- Ancho de banda. LTE-M soporta anchos de banda mayores que las redes LPWAN alternativas, permitiendo casos de uso diferentes que requieran de gran volumen de datos transmitidos.
- Uso de frecuencias licenciadas. Al operar sobre redes de operador, lo hace sobre frecuencias licenciadas, por lo que no habrá interferencia de otras redes.
- Roaming (itinerancia). Puesto que LTE-M es una tecnología basada en LTE, se mantiene la funcionalidad del traspaso entre celdas (eNode B), permitiendo aplicaciones y casos de uso que requieran movilidad.
- Infraestructura existente. Se despliega sobre redes celulares de operador, lo que minimiza el despliegue en coste y complejidad.

Sin embargo, estas ventajas se traducen, de facto, en mayores costes de equipos y mayor consumo energético (menor autonomías de baterías) frente a otras tecnologías LPWAN.

NB-IOT



NB-IoT es el acrónimo de Narrow Band IoT, una tecnología que se despliega sobre infraestructura 4G existente de operadores móviles. Sus ventajas principales son similares a las de LTE-M:

- Infraestructura de red ya existente. NB-IoT usa la red que un operador ya tiene desplegada

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

para servicios de voz y datos.

- Frecuencia licenciada. La frecuencia del operador es licenciada, lo que minimiza las interferencias.
- Estándar abierto. NB-IoT es un estándar definido por el 3GPP, que cualquier empresa puede usar para desarrollar dispositivos y aplicaciones.
- Largo alcance. Comparada con la otra tecnología basada en operador, el LTE- M, NB-IoT tiene mayor alcance.

5.5. Comparación de tecnologías LPWAN

	Coste para usuario	Ventajas	Limitaciones
LTE-M	Coste de módulo: 20€ Coste recurrente: • OPEX: 20-30 €/año • CAPEX: 0 €	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura nacional (potencial) • Alto ancho de banda • Comunicación bi-direccional 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosistema limitado • En etapa de despliegue inicial • Solución costosa • Alto consumo energético • Cobertura rural limitada
NB- IoT	Coste de módulo: 10€ Coste recurrente: • OPEX: 20-30 €/año • CAPEX: 0 €	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura nacional (potencial) • Alto ancho de banda • Comunicación bi-direccional 	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa inicial de despliegue • Estándar no maduro, sujeto a cambios • No hay ecosistema • Despliegue rural limitado • Solución costosa • Alto consumo energético
Ingenu	Coste de módulo: ? Coste recurrente: • OPEX: ? • CAPEX: ?	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor ancho de banda que otras soluciones en banda no licenciada • Frecuencia única Worldwide 	<ul style="list-style-type: none"> • Despliegue sólo en algunas ciudades USA • Ecosistema limitado
LoRa	Coste de módulo: 5€ Coste recurrente: • OPEX: 2 €/año (backend) • CAPEX: 200 € - 2000 € (estación base)	<ul style="list-style-type: none"> • Red privada • Red modular • Back-end abierto vía API 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólo hay un fabricante de chips (Semtech) • Escalabilidad limitada (necesita despliegue de estaciones base)
Sigfox	Coste de módulo: 2-5€ Coste recurrente: • OPEX: 2 €/año • CAPEX: 0 €	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura global • Tecnología madura • Back-end abierto vía API • Sencillo y bajo coste • Muy bajo consumo energético • Ecosistema grande 	<ul style="list-style-type: none"> • Mensajes de sólo 12 bytes en uplink • Downlink limitado • No válido para aplicaciones en tiempo real

5.6. Conclusiones. El futuro del IOT

En este documento se han posicionado, de una forma muy resumida, las distintas opciones tecnológicas de conectividad disponibles para utilizar en un despliegue de aplicaciones IoT de monitorización medioambiental.

Mi visión es que no habrá ninguna tecnología que prevalezca sobre las demás, simplemente cada una de ellas tiene su hueco de aplicación, y encaja mejor en unas u otras aplicaciones verticales.

Sigfox se ha posicionado muy bien, con un despliegue maduro y con un ecosistema amplio de partners que permite montar una solución IoT de una manera fácil y rápida, y con un coste muy limitado.

Bien es cierto que, como se ha apuntado en el presente documento, tiene una serie de limitaciones que le impiden usarlo como tecnología de referencia para soluciones IoT que requieran tiempo real y alto ancho de banda de transmisión de datos. Pero la realidad, a día de hoy, es que muchas de las aplicaciones IoT pueden “vivir” con anchos de banda pequeños y no necesitan tiempo real (pensemos en agricultura inteligente, seguimiento de activos, cadena de frío en logística, etc.).

Habrà que estar atento a la evolución de las redes basadas en estándares LTE (LTE-N y NB-IoT). Detrás de ellas estarán los operadores celulares, con la tracción que ello se supone que tendrá. Llegarán más tarde que otras tecnologías, pero llegarán y fuerte.

Y en tierra de nadie se queda LoRa, que es una alternativa muy buena para despliegue de redes privadas, aunque presenta el inconveniente de que el operador debe montar primero la infraestructura de red (estaciones base), para después montar la solución IoT de usuario.

En general, cualquier implantación de una solución IoT y selección de la tecnología de conectividad se debería preguntar, al menos, los siguientes puntos para decidir la mejor opción:

- i) Flexibilidad para usar la tecnología de conectividad seleccionada para otras aplicaciones verticales
- ii) ¿Utiliza un protocolo de comunicación seguro?
- iii) Aspectos técnicos: cobertura, capacidad, comunicación bi-direccional, robustez frente a interferencias.
- iv) Coste de los dispositivos: nodo, batería, etc.
- v) Ecosistema alrededor de la tecnología: proveedores de equipos, de soluciones, de módulos de radio, etc.

EL FUTURO DEL IOT

Sea cual sea la tecnología de conectividad usada, lo que parece claro es que en un futuro muy cercano tendremos miles de millones de “cosas conectadas” enviando masivas cantidades de información a la nube. La única forma de que esa información sea útil será mediante la analítica de datos. Y esto generará nuevas formas de “relacionarnos” con el IoT. De hecho, ya se han generado nuevas profesiones que no eran imaginables hace pocos años, relacionadas con esta analítica de datos: científicos de datos.

Y el segundo escalón de esta evolución deberá ser la inteligencia artificial (IA): que a partir de la información procesada de esos masivos datos y de las conclusiones generadas, las máquinas sean capaces de aprender de sus propios análisis de datos para corregir las conclusiones que generan.

Referencias y Enlaces de interés

- www.lora.alliance.org
- www.sigfox.com
- www.ingenu.com
- <https://www.gsma.com/iot/long-term-evolution-machine-type-communication-lte-mtc-cat-m1/>
- <https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/>

6. LA TELEDETECCIÓN FORESTAL EN ESPAÑA USANDO LANDSAT-8 OLI/TIRS Y SENTINEL-2 MSI EN EL PERÍODO 2013-2018

Alfonso Alonso-Benito. Colegio Oficial de Ingenieros de Montes. Consultor Medioambiental en la Comunidad Canaria

6.1. Resumen

El pasado 11 de febrero se cumplieron 5 años del lanzamiento del satélite Landsat-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), que daba continuidad a la serie Landsat de la NASA (Landsat Data Continuity Mission, LDCM). Por otro lado, el 23 de junio se han cumplido 3 años del lanzamiento de Sentinel-2A, y el 7 de marzo, el primer año en órbita del gemelo Sentinel-2B; ambos del programa Copernicus de la ESA (European Space Agency). Por lo antedicho, se analizan los artículos publicados en las revistas internacionales encuadradas en el primer cuartil, de acuerdo al JCR (Journal Citation Report), dentro de las categorías de teledetección (Remote Sensing), y forestal (Forestry), que usen Landsat-8 y/o Sentinel-2, y se centren en el sector forestal de España. De acuerdo a la categoría teledetección, en el período 2013-2018 se han publicado un total de 18.311 artículos. Si filtramos estos datos totales, por palabras claves, como España; solo representan el 2,84%; si usamos Landsat-8, el 3,46%; Sentinel-2, un 1,82%. De todos ellos, solo tres artículos (un 0,02%) se cruzan en más de dos palabras clave, es decir, son trabajos situados en España en el sector forestal usando Landsat-8 o Sentinel-2. Si consideramos el uso de cualquier otro sensor en el sector forestal español, encontramos 32 artículos publicados (un 0,17% del total), lo que equivale al 6,15% de lo publicado sobre España.

Palabras clave: Landsat-8, Sentinel-2, forestal, teledetección, España

6.2. Introducción

Este año se han cumplido cinco años desde el lanzamiento del satélite Landsat-8 OLI/TIRS, y tres años de Sentinel-2A. Por este motivo se analizan las publicaciones realizadas en este período de tiempo tanto en revistas internacionales como nacionales, para comprobar cómo está siendo el uso de ambos sensores dentro de la teledetección forestal en España.

En la primera parte de este trabajo se hablará de ambos sensores, y los programas a los que pertenecen. En una segunda parte se analizan las publicaciones hechas en revistas indexadas en el primer cuartil del JCR (Journal Citation Reports), de la revista de la Asociación Española de Teledetección, y las tesis doctorales leídas en las universidades españolas, de acuerdo a TESEO. El trabajo acaba con una conclusión que intenta obtener una respuesta al bajo porcentaje de publicaciones encontradas.

6.3. Landsat-8 OLI/TIRS

Cuando hace 46 años, el 23 de julio de 1972, Estados Unidos lanzó el primer satélite dedicado a la observación de la Tierra, el ERTS (Earth Resource Technology Satellite), pocos hubieran pensado que en 2018 ya estarían orbitando nuestro planeta siete satélites de la serie Landsat.

Los tres primeros Landsat (se llamó Landsat-1 al ERTS desde 1975, cuando se lanzó Landsat-2) estaban equipados con un sensor de barrido MSS (Multispectral Scanner) que tenía cuatro bandas (dos en el visible y dos en el infrarrojo próximo), además de una térmica para Landsat-3. Durante los años 80, se cambió el diseño de los sensores para Landsat-4 y Landsat-5 (considerado el satélite de observación de la Tierra más longevo de la historia, estuvo en funcionamiento durante casi 30 años, desde 1984 hasta 2013), equipando un sensor TM (Thematic Mapper), que mejoraba la resolución espacial, espectral y radiométrica de los anteriores. Landsat-6 nunca alcanzó su órbita por un problema durante el lanzamiento; y en julio de 2003, se lanzaría con éxito Landsat-7 con un sensor mejorado, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), que desgraciadamente presentó un fallo mecánico en el SLC (Scan Line Corrector) de los sensores, que produce una pérdida de información (la imagen aparece con un bandeo) de un 20% en cada escena capturada. Tuvimos que esperar hasta el 11 de febrero de 2013 para ver el nuevo sucesor de la serie, Landsat-8, con dos sensores nuevos compuesto por un multiespectral, llamado OLI (Operational Land Imager), y otro TIRS (Thermal Infrared Sensor). Este satélite recoge información en nueve bandas espectrales con resolución espacial de 30 m, además de dos bandas térmicas con resolución espacial de 100 m (Ilustración 29).

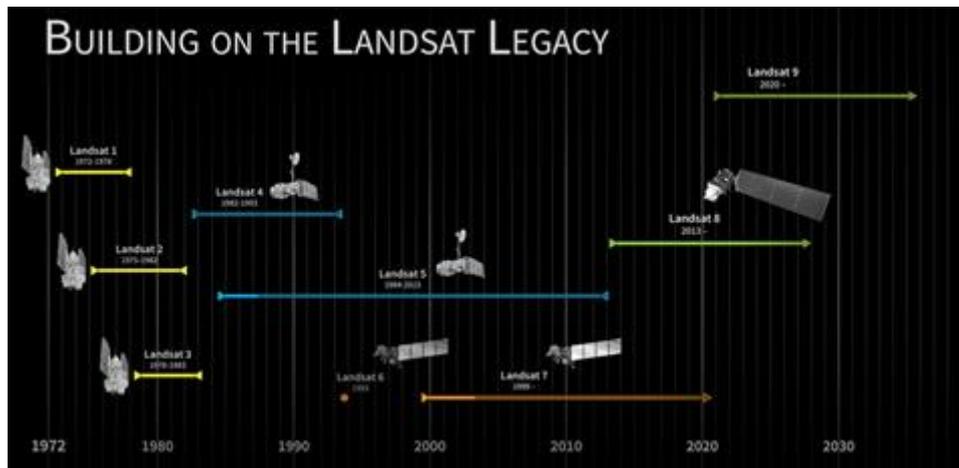


Ilustración 29: Serie Landsat. Fuente: NASA.

Según el calendario previsto por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el próximo 2020 será lanzado Landsat-9 con sensores similares al anterior pero mejorados, los llamados OLI-2 y TIRS-2.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Hasta la fecha, la serie Landsat constituye el mayor archivo histórico de imágenes de satélite de la Tierra, de las cuales un 14,8% (poco más de 1 millón de escenas), han sido grabadas por Landsat-8 a un ritmo de unas 700 escenas diarias nuevas (Ilustración 30).

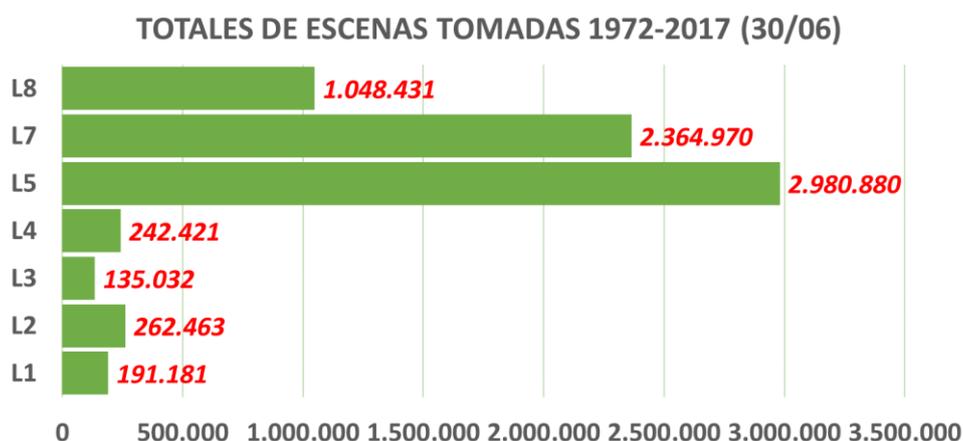


Ilustración 30: Escenas totales tomadas por los diferentes Landsat desde 1972 hasta el 30 de junio de 2017. Elaboración propia a partir de datos tomados de la NASA.

Las características de las imágenes de Landsat-8 OLI/TIRS son las que figuran en la siguiente table. A nivel global, la Tierra se divide en una cuadrícula espacial conformada por path y raw que definen cada escena que toma el satélite.

	Landsat 8 LI/TIRS
Rango espectral (μm)	0,43 – 12,51
Resolución espacial (m) (PAN/VNIR/SWIR/TIR)*	15/30/30/100
Ancho de barrido (km)	185 x 170 **
Resolución radiométrica (bit)	12 / 16
Resolución temporal	16 días
Número de bandas (PAN/VNIR/SWIR/TIR)	1/6/2/2
Costo adquisición	gratis

*PAN = pancromático / VNIR = visible e infrarrojo próximo / SWIR = infrarrojo corto / TIR = térmico.
** Landsat 8 OLI/TIRS toma los datos de forma continua, y se ofrece en escenas de 185 x 179 km.

Ilustración 31: Características de Landsat-8 OLI/TIRS.

6.4. Sentinel-2

El Programa COPERNICUS de la Agencia Europea del Espacio (European Space Agency, ESA) se centra en la observación de la Tierra, para dotar a todo el mundo de datos gratuitos y abiertos.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Este programa es el sucesor del programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security, Monitoreo Global del Medioambiente y Seguridad).

Actualmente el programa Sentinel está compuesto por siete satélites compuestos por:

- **SENTINEL-1A y 1B**, lanzados en abril de 2014 y 2016. Es un satélite con sensor RADAR. Los 1C y 1D serán lanzados en 2021 y 2023.
- **SENTINEL-2A y 2B**, lanzados en junio de 2015 y marzo de 2017 respectivamente. Son satélites con sensores multispectrales. Los 2C y 2D serán lanzados en 2022 y 2023.
- **SENTINEL-3A y 3B**, lanzados en febrero de 2016 y abril de 2018 respectivamente, proporcionan datos del océano fundamentalmente, y la tierra (detección de incendios).
- **SENTINEL-4**, es un sensor que irá a bordo del nuevo METEOSAT de Tercera Generación, servirá para el monitoreo de gases de la atmósfera. Previsto para 2021.
- **SENTINEL-5P** (P por PRECURSOR), lanzado en octubre de 2017, proporciona datos de los gases de la atmósfera.
- **SENTINEL-5**, también medirá los gases de la atmósfera, e irá a bordo de los satélites meteorológicos METOP de Segunda Generación. Previsto para 2021.
- **SENTINEL-6A y 6B**, radar altímetro para medir la altura de la superficie de los océanos. El primero está previsto para 2021, y para el segundo aún no hay fecha.

El satélite Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015, y consta de un sensor MSI (MultiSpectral Instrument) que toma imágenes en 13 bandas espectrales con una resolución espacial de 10 (bandas 2, 3, 4 y 8), 20 (bandas 5, 6, 7, 8a, 11 y 12) y 60 (bandas 1, 9 y 10) metros (Ilustración 32). El satélite tiene un ancho de barrido de 290 Km. El satélite-2B fue lanzado el 7 de marzo de 2017, y tiene el mismo sensor que Sentinel-2A. Ambos, están separados por 180°, y entre los dos la revisita de una misma zona es cada 5 días en el Ecuador. Estos satélites cubren una zona de la Tierra comprendida entre 56° sur y 84° norte.

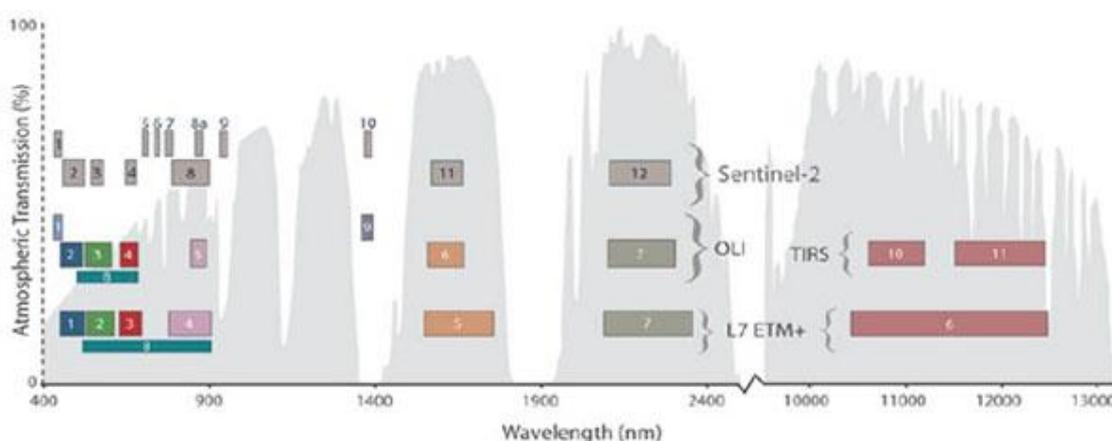


Ilustración 32: Comparación de las bandas de los satélites Landsat 7 y Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-2. Fuente: tomado de la ESA.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las escenas del programa Sentinel-2 se disponen de acuerdo a tiles, que cubren toda la Tierra. Las características de estas imágenes se encuentran en la siguiente tabla.

	Sentinel-2A / Sentinel-2B
<i>Rango espectral (μm)</i>	0,39 – 2,44
<i>Resolución espacial (m) NUBES/RGB/NIR/SWIR</i>	60/10/20/20
<i>Ancho de barrido (km)</i>	290**
<i>Resolución radiométrica (bit)</i>	8 / 12 / 16
<i>Resolución temporal</i>	5 días***
<i>Número de bandas (NUBES/RGB/NIR/SWIR)</i>	3/4/4/2
<i>Costo adquisición</i>	gratis

*NUBES = bandas especiales para aerosoles, vapor de agua y cirrus / RGB = incluye las bandas RGB y una banda NIR / NIR = infrarrojo próximo / SWIR = infrarrojo corto.
 ** Las escenas que podemos descargar tienen una superficie de 100x100 Km².
 *** En el Ecuador y contando los dos. De forma individual la revisita es de 10 días.

Ilustración 33: Características del satélite Sentinel-2A.

6.5. Teledetección forestal con Landsat-8 y Sentinel-2

6.5.1. Diseño del análisis

Para este estudio se ha fijado el período comprendido entre 2013-2018, para lo cual se ha elegido el primer cuartil de las revistas internacionales más importantes de acuerdo al índice JCR (Journal Citation Reports) tanto para la categoría TELEDETECCIÓN (remote sensing) como FORESTAL (forestry). En la segunda categoría se han eliminado (a efectos de cuantificar las publicaciones realizadas) aquellas revistas que, por su tema, no tratan la teledetección de la Tierra propiamente dicha, ya que son publicaciones más específicas de asuntos relacionados con genética, economía o estructuras, por citar algunas (Figura 4).

Para realizar este estudio se han establecido una serie de filtros, que se exponen a continuación:

- España: Se filtraron los resultados al ámbito de España.
- Forestal: Se filtraron todos los trabajos realizados en España en el sector forestal.
- Landsat-8: Se filtraron todos los trabajos realizados en España en el sector forestal con datos obtenidos con el satélite Landsat-8.
- Sentinel-2A y/o Sentinel-2B: Se filtraron todos los trabajos realizados en España en el sector forestal con datos obtenidos con los satélites Sentinel-2A y/o Sentinel-2B.

In Cites Journal Citation Report CLARIVATE ANALYTICS				
Journal Data Filtered By: Selected JCR Year: 2017- Selected Editions: SCIE- Selected Categories: "FORESTRY" - Selected Quartiles: Q1 - Selected Category Scheme: WoS				
Rank	Full Journal Tittle	Total Cites	Journal Impact Factor	Eigenfactor Score
1	Agricultural and Forestry Meteorology	15.550	4,039	0,01997
2	Current Forestry Reports	163	3,548	0,0006
3	Tree Phisiology	9.476	3,389	0,00839
4	Forest Ecology and Management	32.513	3,169	0,03297
5	Urban Forestry & Urban Greening	3.193	2,782	0,00477
6	Journal of Forestry	2.283	2,675	0,00204
7	New Forests	1.562	2,664	0,00213
8	Journal of Vegetation Science	7.622	2,658	0,00862
9	Forestry	2.397	2,638	0,00291
10	Forest Policy and Economics	3.378	2,496	0,00497
11	International Journal of Wildland Fire	4.171	2,445	0,00517
12	Forest Ecosystems	229	2,426	0,00088
13	European Journal of Forest Research	2.491	2,409	0,00458
14	Annals of Forest Science	3.341	2,357	0,00381
15	Applied Vegetation Science	1.866	2,331	0,00282
16	Holzforschung	4.282	2,079	0,00229

Ilustración 34: Revistas incluidas en el primer cuartil de JCR para el año 2017 (último publicado). Tomado de JCR.

Por otro lado, también se ha realizado una búsqueda en la Revista de la Asociación Española de Teledetección, Revista Foresta del Colegio de Ingenieros Técnicos Forestales y la revista MONTES del Colegio de Ingenieros de Montes. Como punto final, se ha analizado la base de datos TESEO para ver las tesis leídas en las universidades españolas en el mismo período relacionadas con la teledetección forestal.

6.6. Revistas del JCR.

En las dos categorías se han aplicado los filtros a que se encontrasen en el título del artículo, en el resumen (abstract) o en las palabras claves. En las Figuras 28 y 29, podemos ver el número de publicaciones para las revistas que han estado incluidas en el primer cuartil de las categorías teledetección y forestal durante los años 2013-2017 (último año del que se han publicado los datos).

La leyenda se explica de la siguiente forma:

- ESP: artículos publicados en el ámbito de España.
- L8: artículos que usan imágenes de Landsat-8 OLI/TIRS.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- S2: artículos que usan imágenes de Sentinel-2A o Sentinel-2B.
- ESP+L8 / ESP+S2: artículos con zona de estudio en España y que usan Landsat-8 OLI/TIRS o Sentinel-2A o Sentinel-2B.
- ESP+S2+FOR / ESP+L8+FOR: artículos con zona de estudio en España y que aplican unos de los dos satélites para la teledetección forestal.
- ESP+FOR+SAT: artículos con zonas de estudio en España y que aplican la teledetección al sector forestal, pero sin utilizar Landsat-8 o Sentinel-2.

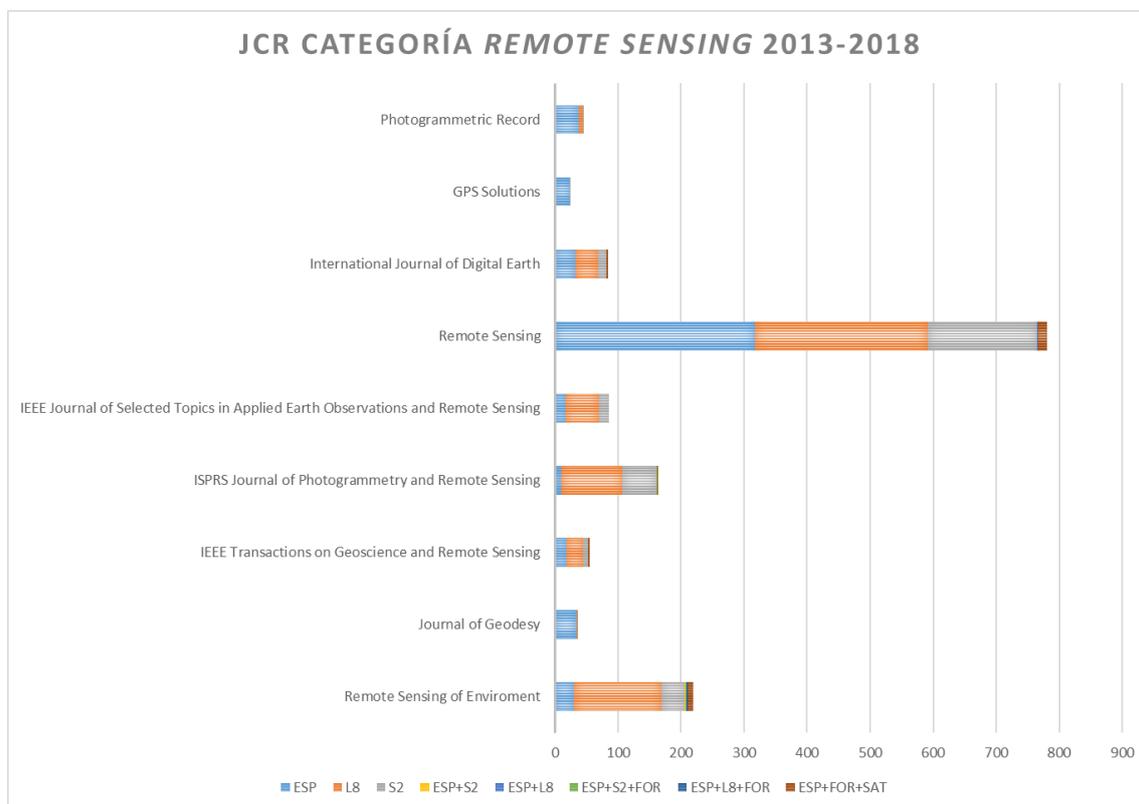


Ilustración 35: Publicaciones por revista en la categoría TELEDETECCIÓN entre 2013 y 2017. Elaboración propia a partir de datos de JCR.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

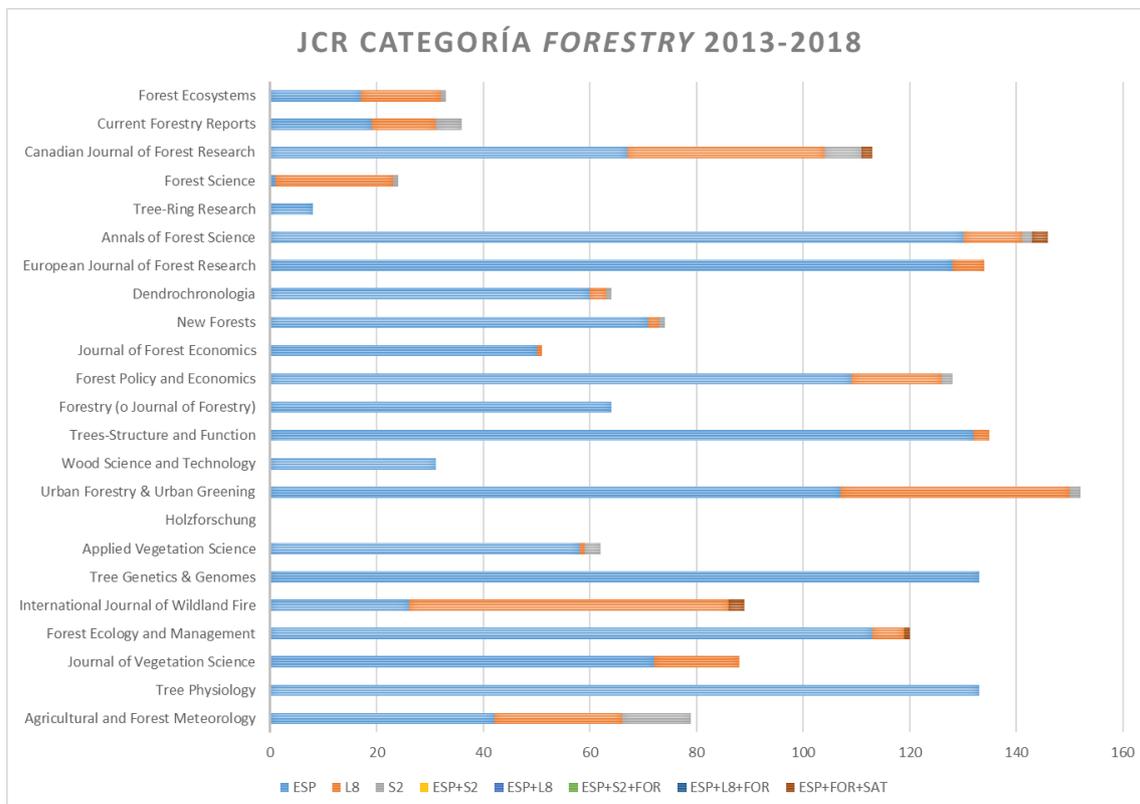


Ilustración 36: Publicaciones por revista en la categoría FORESTAL entre 2013 y 2018. Elaboración propia a partir de datos de JCR.

Respecto a la categoría teledetección en el primer cuartil se encuentran nueve revistas, que han publicado 18.311 artículos entre 2013-2018, de los cuales un 5,3% han usado Landsat-8 o Sentinel-2; solo 520 artículos tienen como zona de estudio España, lo que supone un 2,8% del total publicado. De estos 520 artículos, solo 33 (6,3%) usaron la teledetección en el sector forestal, y de ellos únicamente tres artículos (el 0,6%) usaron Landsat-8 o Sentinel-2. Si están interesados, en la Tabla 3 pueden acceder a los trabajos.

Revista	Título	Autores	DOI
Remote Sensing of Environment	Generation of high-resolution fuel model maps from discrete airborne laser scanner and Landsat-8 OLI: A low-cost and highly updated methodology for large areas	Marino <i>et al.</i>	https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.020

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Remote Sensing of Environment	Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery	Fernández-García <i>et al.</i>	https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.029
ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	Gaussian processes uncertainty estimates in experimental Sentinel-2 LAI and leaf chlorophyll content retrieval	Verrelst <i>et al.</i>	https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.012

Ilustración 37: Publicaciones de teledetección forestal con Landsat-8 o Sentinel-2 entre 2013 y 2018, en las revistas del primer cuartil de la categoría Teledetección.

En la categoría FORESTAL no mejoran las cifras, ya que muchas de las revistas que han estado incluidas en el primer cuartil durante este lustro, un total de 23 tienen como tema principal cosas ajenas a la teledetección. Si atendemos a las cifras globales, sin discriminar por tema principal de la publicación, en estos cinco años se han publicado un total de 19.980 artículos, de los cuales un 7,9% han tenido como protagonista alguna zona de España; solo nueve artículos han tratado la teledetección forestal, lo que supone un 0,6%, y todos ellos sin usar Landsat-8 o Sentinel-2. Si eliminamos aquellas publicaciones que no publican nada de teledetección, respecto a España encontramos 1.222 artículos, que suponen un 8,5% del total, de los cuales un 0,7% versan sobre teledetección forestal.

6.7. Revista de la Asociación Española de Teledetección.

La Asociación Española de Teledetección publica una revista que, aun no estando indexada en el JCR, sí se encuentra en el Catálogo LATINDEX y en Scopus, se ha incluido en este trabajo, por tratarse de la revista oficial del tema en España.

En estos cinco años, se han publicado un total de 119 artículos, de los cuales un 28,6% se centran en el sector forestal, y de estos un 17,6% han usado imágenes de Landsat-8 o Sentinel-2 (Ilustración 38).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

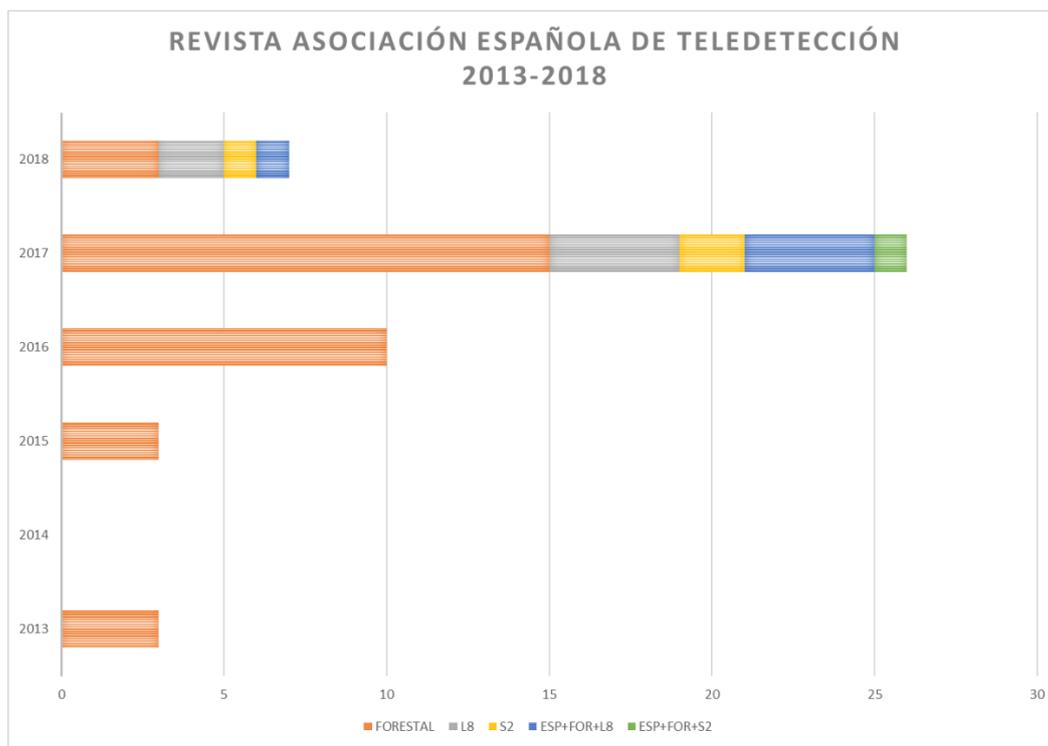


Ilustración 38: Publicaciones de teledetección forestal en la Revista de la Asociación Española de Teledetección. Elaboración propia.

Si están interesados, en la siguiente tabla pueden acceder a los trabajos.

Revista	Título	Autores	DOI
Revista de Teledetección	Land use classification from Sentinel-2 imagery	Borrásset <i>et al.</i> *	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133
Revista de Teledetección	Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images	Botella-Martínez <i>et al.</i>	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095
Revista de Teledetección	Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013	Arellano <i>et al.</i>	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Revista de Teledetección	Critical analysis of severity indices and affected surface by the wildland fire on Sierra de Luna (Zaragoza)	Guillem-Cogollos <i>et al.</i>	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117
Revista de Teledetección	Potential of UAV images as ground-truth data for burn severity classification of Landsat imagery: approaches to an useful product for post-fire management	Pla <i>et al.</i>	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7140
Revista de Teledetección	Severity study in Albinyana (Catalunya) forest fire, using SENTINEL-2 data	Guerrero <i>et al.</i> **	https://doi.org/10.4995/raet.2017.7105

* Aunque está más centrada en aspectos agrícola, se ha incluido, ya que generalmente los Mapas de Usos del Suelo suelen incluir parte forestal.

** Se trata de un caso práctico, no de un artículo propiamente dicho, pero se ha incluido en este trabajo.

Ilustración 39: Publicaciones de teledetección forestal con Landsat-8 o Sentinel-2 entre 2013 y 2018, en la revista de la Asociación Española de Teledetección.

6.8. Base de datos TESEO.

La base de datos TESEO perteneciente al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, constituye el recopilatorio de todas las tesis doctorales leídas en las universidades españolas.

Para este trabajo se han considerado las tesis leídas entre el curso 2012-2013 y 2017-2018, usando como único filtro la categoría teledetección (Ilustración 40).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

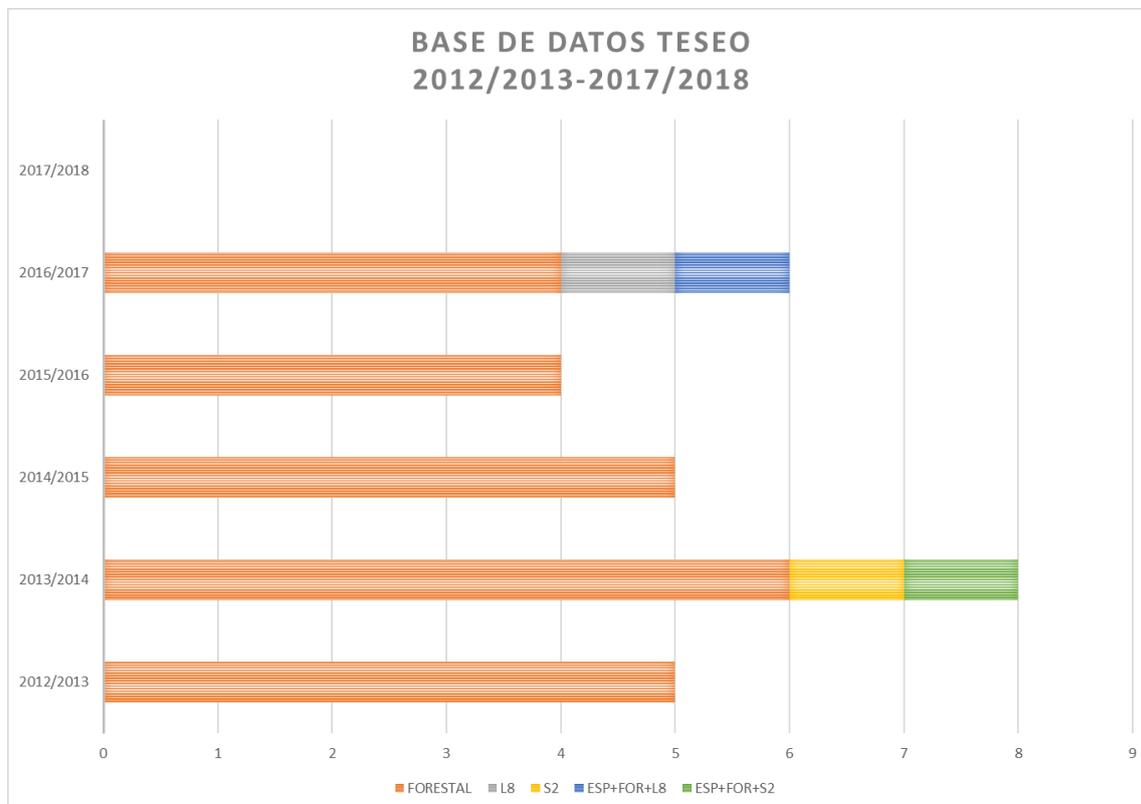


Ilustración 40: Tesis leídas en las universidades españolas. Elaboración propia a partir de datos de TESEO.

En estos cinco años se han leído un total de 78.717 tesis doctorales, de las cuales el 0,2% (129 tesis) pertenecen a la categoría teledetección. De este porcentaje, 24 tesis tienen su ámbito de estudio en el sector forestal, un 18,6%, y de ellas, solo dos tesis doctorales han usado imágenes de Landsat-8 o Sentinel-2.

En la siguiente tabla pueden ver las tesis doctorales publicadas relacionadas con el objeto del presente trabajo.

Curso	Título	Autor	Marcador
2013-2014	OPTIMIZED AND AUTOMATED ESTIMATION OF VEGETATION PROPERTIES: OPPORTUNITIES FOR SENTINEL-2	Rivera Caicedo, Juan Pablo	https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1098420
2016-2017	ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA	Ariza Pastrana, Alexander	https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=432144

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

DEL PAISAJE POR INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE TELEDETECCIÓN		
---	--	--

Ilustración 41: Tesis doctorales leídas que usan la teledetección forestal.

6.9. Conclusiones

Cuando hace unos meses tuve la idea de este trabajo para el CONAMA 2018, pensaba que encontraría más publicaciones que hiciesen uso de Landsat-8 y/o Sentinel-2 en la teledetección forestal. Si nos fijamos en las cifras de publicaciones hasta la fecha, que usen uno u otro satélite, considerando ambos de forma conjunta, no llegan ni al 5,5% de lo publicado en la categoría de teledetección en las revistas internacionales, y no son mejores los datos en el resto de revistas analizadas.

Si vemos la Ilustración 42, podemos decir que el 90% de las publicaciones hechas, han estado centradas en los incendios forestales, en cualquiera de sus variantes, predominando el tema del análisis post incendio, lo cual es lógico, si pensamos que los incendios forestales son uno de los mayores problemas en España todos los veranos.

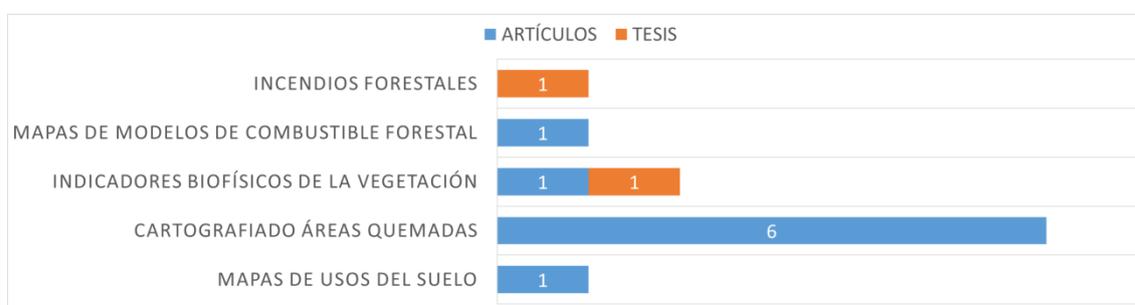


Ilustración 42: Publicaciones en función del tema forestal que tratan.

Analizando los datos de forma global, y pensando cual puede ser el motivo de esta escasa aportación de ambos satélites en España, no creo que se trate del coste de las imágenes, pues ambas son gratuitas. En cuanto a la resolución espacial, tenemos un rango de entre 10-60 m, lo cual para estudios de ámbito local (desde el nivel municipal hasta el provincial, e incluso podría incluirse el autonómico) está muy bien, hasta podría llegar a ser usado en una escala nacional, tal como hicieron Hansen et al. (2013), que publicaron el primer mapa global de la deforestación de la Tierra, con imágenes de Landsat-8 a resolución de 30 m. O el nuevo producto de detección temprana de incendios (Schroeder et al., 2016) usado ya por algunos países, que utiliza imágenes de Landsat-8, mejorando la resolución espacial de este tipo de productos, que se viene haciendo con sensores de media y baja resolución espacial (por encima de 100 m). Y respecto a la resolución temporal, es adecuada para gran parte de zonas

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

de la Tierra, tanto los 16 días de Landsat-8 como los 10 días el tándem de Sentinel-2 (5 días en el Ecuador).

Por lo antedicho, el único motivo que puede causar esta “falta de uso” puede deberse a que trabajamos a una escala muy local, donde son más adecuados sensores con muy alta resolución espacial (por debajo de 5 m, e incluso de 2 m), pero tienen el inconveniente de que no suelen ser gratuitos.

Para acabar, yo recomendaría el uso de cualquiera de los dos satélites aquí analizados, ya que tienen una resolución espacial, temporal y espectral adecuada para la mayoría de los estudios que se hacen. Espero que en los próximos años su uso sea más frecuente, y que dentro de cinco años podamos decir que el porcentaje de artículos publicados sobre ellos en el sector de la teledetección forestal española ha subido en al menos un 15-20%.

6.10. Agradecimientos

Quiero dar las gracias a la organización de CONAMA 2018 por volver a confiar en mí para participar como ponente en este congreso.

6.11. Bibliografía

- [1] Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justive, C.O.; Townshend, J.R.G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from:<http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
- [2] Schroeder, W.; Oliva, P.; Giglio, L.; Quayle, B.; Lorenz, E.; Morelli, F. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 185, November 2016, pp. 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.032>.

7. TELEDETECCIÓN Y GIS. HERRAMIENTAS DE GESTIÓN PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Nicanor Prendes Rubiera. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica

7.1. Introducción

Uno de los aspectos, acaso el menos considerado en los análisis de Cambio Climático y, sin embargo de gran incidencia, es la incertidumbre generada en la disponibilidad de los recursos naturales ligados al territorio, con la consiguiente variabilidad de los episodios extremos (sequías, inundaciones, perfiles edáficos, etc.) y en los que debe contemplarse, como variable compleja añadida, su distribución, no homogénea, tanto en el espacio como en el tiempo. Se incluye, además, otro parámetro en la formulación de equilibrio; la presión antrópica, que afecta a determinadas regiones que se transforman en sistemas derivados, y dependientes, de los adyacentes.

El paradigma de este planteamiento podría ser, perfectamente, la revisión en la planificación que dichos recursos demandan, incluyendo las nuevas variables -y parámetros- ya mencionados, para corregir -y contrarrestar- el grado de ambigüedad estadística que el cambio Climático introduce en las modelizaciones resultantes.

De este exordio se colige que en la gran mayoría de los estudios realizados sobre Cambio Climático, en líneas generales, sólo se aporta información de lo que podría ocurrir, sin abordar el análisis de probabilidades que ese suceso provoca en sí mismo (DWR, 2006) y tal y como han puesto de manifiesto (Marcos, P. y Pulido, M., 2017).

La explicación argüida para justificar este procedimiento metodológico hay que buscarla, según Córdoba, D., 2012 en: "Que toda degradación ambiental es un proceso de alteración estructural de la composición biológica de un ecosistema que aboca en un deterioro, paulatino, funcional y que, aunque aquellos tienen una gran capacidad -inherente- de adaptación a estas variaciones e -incluso- pueden llegar a recuperar el estado original tras una perturbación, hay un umbral de agotamiento en el que su resistencia y resiliencia se ve sobrepasada y se alcanza el punto de no retorno".

La evidencia de este fenómeno se refleja por el cambio en el estado de uno, o más, de los tres recursos: suelo, vegetación y agua (Stocking, M.A. & Murnaghan, N. 2001) que conforman la base de los sistemas de soporte de todo ecosistema y, por ello, están estrechamente relacionados entre sí.

La transversalidad del Cambio Climático, es decir la independencia en la afección -pero no de sus consecuencias- a cualquiera de los tres recursos, conlleva una aceleración degradativa, sobre todo en situaciones próximas al umbral mínimo de respuesta, del ecosistema ante

estreses físico-climáticos, tal como Lavergne et al. 2006 ha encontrado en migraciones de aves; y Parolo G, & Rossi G. 2008, en la sustitución de taxones de pisos bioclimático inferiores.

La variable elegida, en este caso, es el recurso hídrico por su importancia ambiental y en los análisis, tradicionalmente e incluyendo la variable Cambio Climático, se limitaba a aplicar, a las series históricas, los porcentajes de reducción de volúmenes de agua de la IPH, obteniendo los recursos disponibles para el horizonte 2027 (Olcina, J., 2014) y actualizando éstos coeficientes (horizonte 2015-21) de acuerdo con el estudio del CEDEX (CEH-DGA, 2011), con las novedades metodológicas de Marcos, P. y Pulido, M., 2017).

7.2. Planteamiento del Problema

Hasta ahora, sin embargo, los modelos predictivos usados en el análisis de la incidencia del Cambio Climático en la ordenación del territorio y su relación con el agua (Murillo, J.M. et al. 2013), en sus diferentes modalidades (subterránea, de escorrentía, etc.), se basaba en los tratamientos matemáticos de las series históricas (Cantor, D.C. y Ochoa, A. 2013), teniendo en cuenta que, en muchos de ellas y, sobre todo, para fenómenos extremos (sequía -Estrela, T. y Vargas, E. 2012- e inundaciones - Díez-Herrero, A. et al. 2012-) se había constatado un comportamiento paramétrico no lineal (Delacámara, G., cord. 2017) y caótico (Cantor, D.C, 2011), lo que complicaba la certidumbre de los resultados, obligando a considerar una serie de escenarios (Miró, J.J., et al. 2013) en la que se contemplan las tres variables esenciales: Vulnerabilidad, frente a Variabilidad y Cambio Climático, estableciendo la capacidad adaptativa del sistema (Dessai et al, 2004)

La obtención de cada una de estas tres variables es, en sí misma, compleja. Así la Variabilidad Climática depende de las series históricas consideradas (Cantor, D.C, 2011) y los problemas que la estacionalidad e interanualidad (Caballero, I.J., 2013), como fenómenos cíclicos, provoca sobre estas secuencias registradas (de ahí que se deba recurrir a los procesos estadísticos formales (Hamed, K.H., 2007) para preparar los estadísticos de base). Por otra parte, el Cambio Climático presenta una variabilidad espacial en sus impactos (Estrela, T. et al., 2012), por su carácter no homogéneo y dependiente de los valores climáticos locales, lo que implica un proceso de desagregación espacial. La combinación de estas dos variables dará, sobre la componente espacial, el factor de vulnerabilidad que sería la exposición al riesgo de los elementos ubicados en el área de afección (Marcos, P. y Pulido, M., 2017b).

Las distintas posibilidades de este tipo de análisis da lugar a escenarios climáticos que son la descripción de cómo evolucionaría el fenómeno con las nuevas condiciones deducidas, si estas se mantienen, lógicamente.

Tradicionalmente el IPCC emplea dos tipos de escenarios climáticos de actuación: Los RCP's (Representative Concentration Pathway) y los SSP's (Shared Socio-Economic Pathway), siendo los primeros (Moss, R.H., et al. 2010) los que describen una serie de opciones alternativas de concentraciones de gases de efecto invernadero, en la atmósfera, y en función de una u otra opción se alimentan a los modelos climáticos (Vuuren, D. P. et al, 2011), mientras que los

segundos describen –conjuntamente- un cambio climático, social y ambiental integral (O’Neil et al., 2015 y Riahi, K. et al, 2017).

Ambas opciones plantean algunos problemas, si bien proporcionan una orientación sobre el comportamiento del área a estudiar y, por lo tanto, al menos desde un punto de vista teórico, servirían como herramientas de gestión o planificación. La principal limitación, en la aplicación de escenarios de tipo RCP’s es el sesgo que se genera a causa de la propia indefinición de los modelos aplicados (inexactitud en los parámetros que se usan para definir los procesos físicos; simplificaciones de las condiciones atmosféricas; variables hidrológicas¹ características –como la Escorrentía o la Evapotranspiración (ETp)- de los regímenes hídricos, etc.); mientras que la más significativa de los tipos SSP’s es el carácter descriptivo (Marcos, P. y Pulido, M., 2017b) y, por lo tanto cualitativo, por lo que, y para estudios de detalle, tan sólo suponen una orientación.

7.3. Propuesta Metodológica

Hasta ahora, sin embargo, los modelos predictivos usados en el análisis de la incidencia del Cambio Climático en la ordenación del territorio y su relación con el agua (Murillo, J.M. et al. 2013), en sus diferentes modalidades (subterránea, de escorrentía, etc.), se basaba en los tratamientos matemáticos de las series históricas (Cantor, D.C. y Ochoa, A. 2013), teniendo en cuenta que, en muchos de ellas y, sobre todo, para fenómenos extremos (sequía -Estrela, T. y Vargas, E. 2012- e inundaciones - Díez-Herrero, A. et al. 2012-) se había constatado un comportamiento paramétrico no lineal (Delacámara, G., cord. 2017) y caótico (Cantor, D.C, 2011), lo que complicaba la certidumbre de los resultados, obligando a considerar una serie de escenarios (Miró, J.J., et al. 2013) en la que se contemplan las tres variables esenciales: Vulnerabilidad, frente a Variabilidad y Cambio Climático, estableciendo la capacidad adaptativa del sistema (Dessai et al, 2004)

La obtención de cada una de estas tres variables es, en sí misma, compleja. Así la Variabilidad Climática depende de las series históricas consideradas (Cantor, D.C, 2011) y los problemas que la estacionalidad e interanualidad (Caballero, I.J., 2013), como fenómenos cíclicos, provoca sobre estas secuencias registradas (de ahí que se deba recurrir a los procesos estadísticos formales (Hamed, K.H., 2007) para preparar los estadísticos de base). Por otra parte, el Cambio Climático presenta una variabilidad espacial en sus impactos (Estrela, T. et al., 2012), por su carácter no homogéneo y dependiente de los valores climáticos locales, lo que implica un proceso de desagregación espacial. La combinación de estas dos variables dará, sobre la componente espacial, el factor de vulnerabilidad que sería la exposición al riesgo de los elementos ubicados en el área de afección (Marcos, P. y Pulido, M., 2017b).

¹ El agua afecta al estado de los acuíferos; a humedales; desertificación y desertización (Convención de 1994, Naciones Unidas contra la desertificación) admitiéndose, en el Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), que las zonas áridas y semiáridas son más vulnerables al cambio climático, y asimismo elevó, en 2007, el riesgo de muchos países a sufrir procesos de desertificación por tal efecto climático.

Las distintas posibilidades de este tipo de análisis da lugar a escenarios climáticos que son la descripción de cómo evolucionaría el fenómeno con las nuevas condiciones deducidas, si estas se mantienen, lógicamente.

Tradicionalmente el IPCC emplea dos tipos de escenarios climáticos de actuación: Los RCP's (**R**epresentative **C**oncentration **P**athway) y los SSP's (**S**hared **S**ocio-Economic **P**athway), siendo los primeros (Moss, R.H., et al. 2010) los que describen una serie de opciones alternativas de concentraciones de gases de efecto invernadero, en la atmósfera, y en función de una u otra opción se alimentan a los modelos climáticos (Vuuren, D. P. et al, 2011), mientras que los segundos describen –conjuntamente- un cambio climático, social y ambiental integral (O'Neil et al., 2015 y Riahi, K. et al, 2017).

Ambas opciones plantean algunos problemas, si bien proporcionan una orientación sobre el comportamiento del área a estudiar y, por lo tanto, al menos desde un punto de vista teórico, servirían como herramientas de gestión o planificación. La principal limitación, en la aplicación de escenarios de tipo RCP's es el sesgo que se genera a causa de la propia indefinición de los modelos aplicados (inexactitud en los parámetros que se usan para definir los procesos físicos; simplificaciones de las condiciones atmosféricas; variables hidrológicas² características –como la Escorrentía o la Evapotranspiración (ETp)- de los regímenes hídricos, etc.); mientras que la más significativa de los tipos SSP's es el carácter descriptivo (Marcos, P. y Pulido, M., 2017b) y, por lo tanto cualitativo, por lo que, y para estudios de detalle, tan sólo suponen una orientación.

7.4. Propuesta Metodológica

Partiendo de las anteriores aseveraciones, y aceptando que los impactos derivados del Cambio Climático (sobre el territorio -que es el resultado evolutivo, natural, de las condiciones de equilibrio preexistentes- y sus recursos, hídricos en este caso) se asociarían a los previsibles daños –tanto por exceso (inundaciones) como por defecto (sequías)-, y desequilibrios (Chuvienco, E. y Martín, M^a. P. 2004), producto de la causalidad en la variabilidad producida en las fluctuaciones (Brundtland, G. H. 2017) que regulan los propios sistemas de cuencas, ya que lógicamente, en principio, debe asumirse que la diversidad ecológica está adaptada (Fernández, G. et al. 2009), y su efecto sobre las actividades (sociales, industriales, agrícolas) que se abastecen del mismo y que, naturalmente, tendrán repercusiones económicas (Moss, R.H., et al. 2010).

Dado que los factores determinantes, y condicionantes, de la potencialidad hídrica se jerarquizan (Cerdá, E, et al. 2017) en dos categorías, en función de la escala de demanda (refiriéndose al número de unidades -aspecto cualitativo- de consumo) que, a su vez, está

² El ejemplo más recurrente sería el de la estacionalidad en la transformación lluvia-escorrentía que, en un escenario de Cambio Climático resulta casi imposible de establecer ya que no hay referencias válidas, ni fiables, en los periodos de control y calibración, tal y como han sugerido Seiller et al., 2012; Thirel et al., 2015 y Marcos, P. y Pulido, M. 2017, entre otros.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

relacionado con el desarrollo del área³; y su nivel de demanda (aspecto cuantitativo y, por tanto, referido al gasto real y equipamientos conectados a la red de abastecimiento), es necesario estimar los parámetros hídricos (T^a , P, Albedo, Escorrentía, ETp, vientos etc.) tanto en el periodo anterior del estudio como del proyectado.

El resultado es una curva de estimación, y cuyo ajuste dependerá de los predictores usados (variables ambientales) y sus rangos de tolerancia con respecto al régimen local.

Este análisis preliminar, limitado –necesariamente– a la zona de actuación efectiva (cuena, unidad geomorfológica, administrativa, etc.) sirve de base para alimentar los modelos predictivos usados en la fenomenología a estudiar según los diferentes escenarios RCP's, que deben restringirse, además, en función de las características sociológicas y demográficas (Moss, R.H., et al. 2010), del tipo de sector industrial (predominancia de un modo de producción sobre otro), de desarrollo, etc.

La integración de la teledetección (Técnica de observación directa del territorio capaz de aportar información del mismo a partir de la obtención de imágenes reales, a través de sensores de respuesta específica) tanto en el rango espacial, como temporal, así como del estado de cada elemento susceptible de interés⁴, aporta, como principal valor, el análisis multiespectral que posibilita la evaluación de los recursos y su estado.

La información procedente de la teledetección, en forma de cartografía temática (Chuvieco, E. y Martín, M^a. P. 2004), es fácilmente derivada a un Sistema de Información Geográfica (GIS) que, además, y referenciado sobre las capas de información (Qi, H., et al. 2013). permite, vinculando a cada unidad de identificación, un polígono asociado a una base de datos relacional, con información de propiedades, tanto de tipo ráster, como vectorial, escalar, y realizar análisis espaciales y temporales a partir de parámetros de propiedades físico-químicas, con la producción de cartografía temática de mapas de probabilidad y estimación ajustados sobre el territorio y, por lo tanto. Susceptibles de contrastar y, si es necesario, corregir.

7.5. Caso de Estudio

La zona elegida para el análisis metodológico ha sido la comarca del río Esgueva, concretamente el Término Municipal de Castroverde del Cerrato⁵, en la Comunidad de Castilla

³Este aspecto es sumamente importante y así se refleja en la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental, estableciéndose una serie de Umbrales, en función de la Escala y del Nivel de demanda, con especificaciones de determinados volúmenes de agua o número de habitantes equivalentes, que exigirá una evaluación de tipo Ordinaria o Simplificada. Anexo I (Grupos 7 y 8) y II (Grupo 8) de la propia ley.

⁴ El paradigma es el análisis multiespectral donde, tradicionalmente, se obtiene datos de la salud de los cultivos y cubiertas vegetales.

⁵ Este afluente tiene la peculiaridad de no estar regulado por ninguna obra hidráulica aguas arriba del punto de estudio lo que facilita el análisis hidrológico.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

León, por sus características peculiares y el estudio que dicho Ayuntamiento ha presentado sobre el plan integral de Inundaciones.

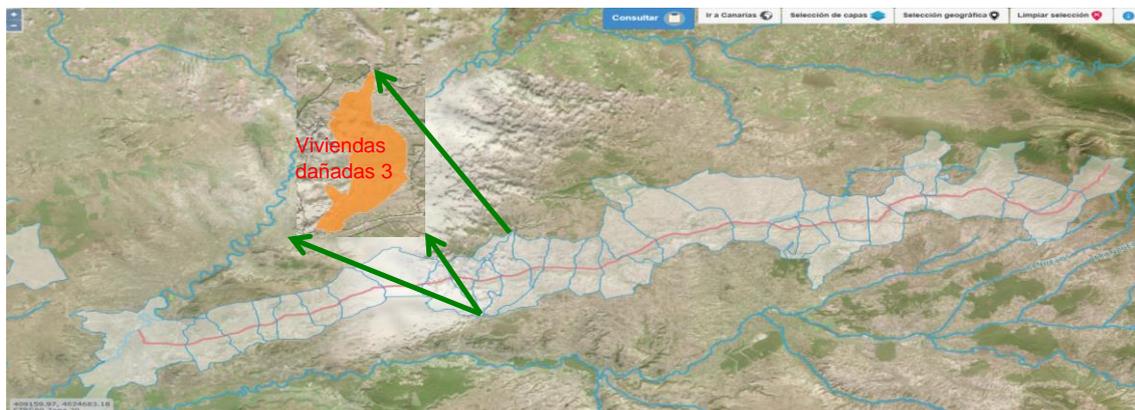


Ilustración 43: Zona y Cuenca de Estudio que, como se observa, debe integrar toda la información hidrológica de la Cuenca el Río Esgueva.

Este Municipio, muy bien documentado, tiene registro, regular, de datos históricos de inundaciones, con un análisis detallado de la evolución demográfica y de índices de peligrosidad y Riesgo poblacional desde 1911. Asimismo, y a través de una serie de estaciones de Aforo, tanto dentro del propio municipio como de los adyacentes (Villanueva de los Infantes) ha elaborado una memoria de las inundaciones, deduciendo los caudales y estimado la divergencia entre los episodios catalogados a partir de inundaciones históricas. A priori, tal y como se reseña en la memoria, el riesgo deducido es bajo.

Caudales y anomalías de caudal de cada episodio de inundación del Catálogo de Inundaciones Históricas							Episodios de inundación deducidos				
Estación de aforos	Fecha inicial	Fecha final	Término municipal	Caudal medio (m ³ /s)*	Caudal máximo (m ³ /s)**	Anomalías de caudal (m ³ /s)***	Estación de aforos	Fecha inicial	Fecha final	Anomalías de caudal medio (m ³ /s)*	Anomalías de caudal máximo (m ³ /s)**
Castroverde de Cerrato (1977-1997)	01/02/1985	19/02/1985	Olmos de Esgueva	1,52	3,1	0,59	Castroverde de Cerrato (1977-1997)	28/01/1978	31/01/1978	11,97	13,98
	24/12/1995	31/12/1995	Castroverde de Esgueva	9,04	10,31	7,7		03/02/1978	15/02/1978	17,01	22,86
Villanueva de los Infantes (1997-2011)	25/01/2001	31/01/2001	Castroverde de Esgueva Piña de Esgueva Villafuerte de Esgueva	0,69	0,71	-1,63		19/02/1978	23/02/1978	11,83	12,24
	28/07/2001	-	Fombellida	0,08	0,08	-0,33		24/03/1978	19/04/1978	11,03	12,62
								31/05/1978	18/06/1978	10,43	10,80
								13/05/1979	16/05/1979	13,28	15,33
								31/12/1981	-	11,71	11,71
							09/12/2000	-	11,16	11,16	
							07/01/2000	08/01/2000	19,53	19,78	
							12/01/2000	14/01/2000	19,75	26,28	
							25/01/2000	31/01/2000	15,64	24,58	
							08/02/2000	09/02/2000	13,50	15,15	
							03/03/2000	13/03/2000	14,71	30,03	

* Caudal medio diario de la duración total del episodio de inundación.
 ** Caudal máximo diario de la duración total del episodio de inundación.
 *** Anomalías de caudal medio de cada episodio.
 Fuente: CHD y R.O.E.A. Elaboración: I. Gurdíel.

* Anomalía de caudal medio de la duración total del episodio de inundación.
 ** Anomalía de caudal máximo de la duración total del episodio de inundación.
 Fuente: R.O.E.A. Elaboración: I. Gurdíel.

Ilustración 44: Tablas obtenidas del informe de Riesgos, facilitada por Protección Civil para Castilla y León, en los que se detallan algunos episodios de Inundaciones y sus caudales en ese punto.

A partir del listado de estos datos se buscan las funciones de correlación (se ha optado por un ajuste lineal simple), y se contrastan con los valores que, para este mismo lugar, dispone el AEMET. El resultado señala un ligero incremento (no significativo, ni determinante, ni condicionante) en la capacidad hídrica del sistema, y que podría explicarse por la posición geográfica del municipio (tramo medio del afluente Esgueva).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La Proyección, a partir de las variables hidráulicas calculadas, con el análisis del Visor de escenarios Adaptecca, (RCP's 8.5), se obtendría la tendencia de la serie (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, gráfico de la derecha) en las que se confirmaría que, para el Esgueva, las precipitaciones (en mm) marcarían un incremento del volumen de agua, así como una mayor recurrencia, con picos más frecuentes a partir del 2025 (el análisis sólo ha proyectado hasta el 2050, en los que se da la estimación de aparición de una inundación importante que es la que se correspondería a un periodo de frecuencia T=100 (obviamente estos datos deben "corregirse", al alza, con las reservas de los acuíferos del subsuelo).

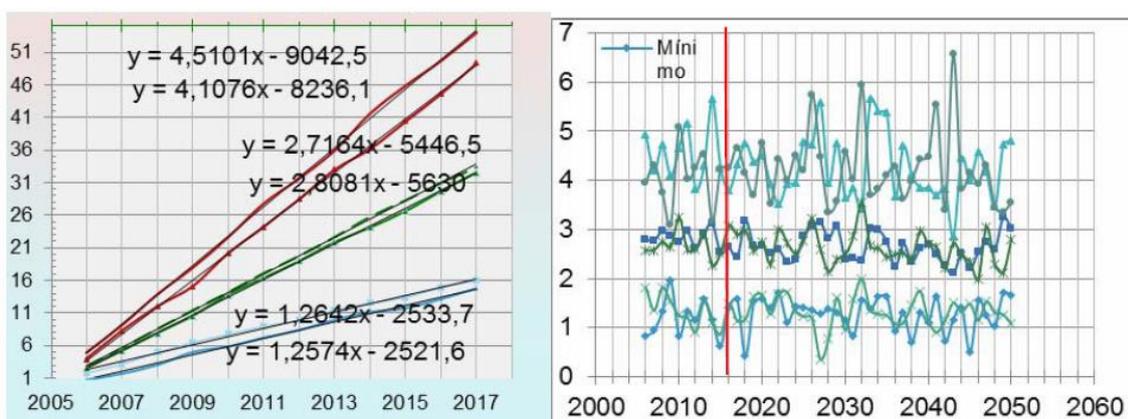


Ilustración 45: Ajustes lineales (izquierda, de la serie histórica, con valores ya registrados) y variaciones de las predicciones, para un RCP's 8.5, de la posible evolución, incluyendo el factor Cambio Climático en esa zona.

La consulta a los archivos disponibles en Protección Civil, señala este periodo de inundación como el más significativo, y para esta zona y con las variables ajustadas derivadas de los análisis estadísticos anteriores.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

LISTADO DE EVENTOS

Rango temporal entre 1900 y 2018 X

Probabilidad de ocurrencia (%) de una inundación en 30 años

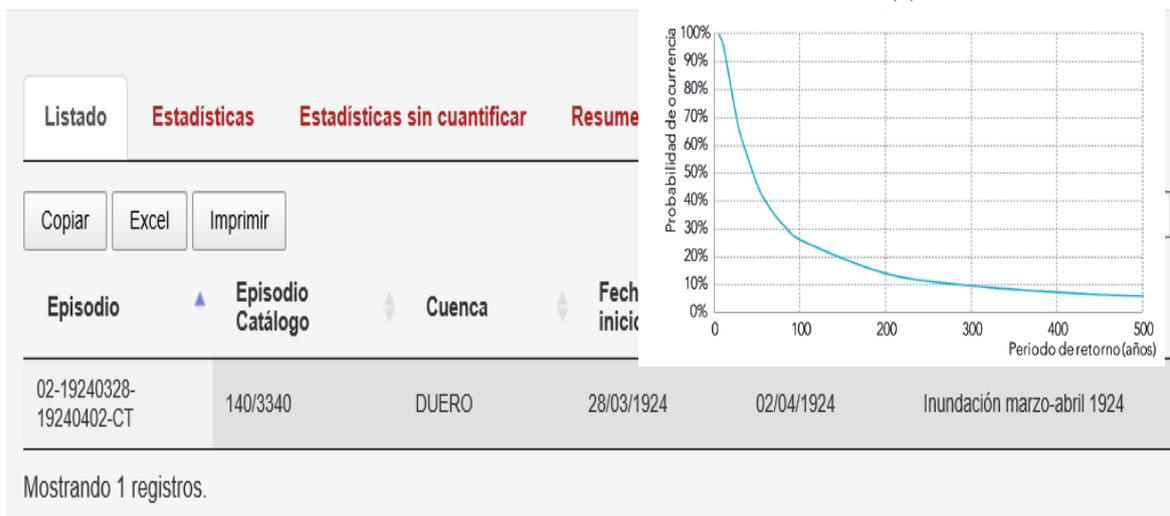


Ilustración 46: Listado de eventos, con similar nivel de precipitación (incluyendo los resultados de las modificaciones achacables a la variable Cambio Climático) y en la que se le ha añadido la ocurrencia de las distintas inundaciones tipo durante un periodo de referencia de 30 años. La comparación de este gráfico con los que se adjuntan en la ilustración 2 confirmaría esa tendencia del incremento de periodos extremos.

El tratamiento estadístico y de modelización, con esta herramienta (Visor Adapteca), por supuesto, nos permite el cálculo simultáneo, de varios escenarios y sus rangos de operatividad, permitiendo cotejar los resultados y decidir, para esta zona concreta que escenario RCP's se adecúa más a los datos reales que, hasta el 2017, se vienen manejando, asumiendo, asimismo, la relevancia y desarrollo que se pueda prever.

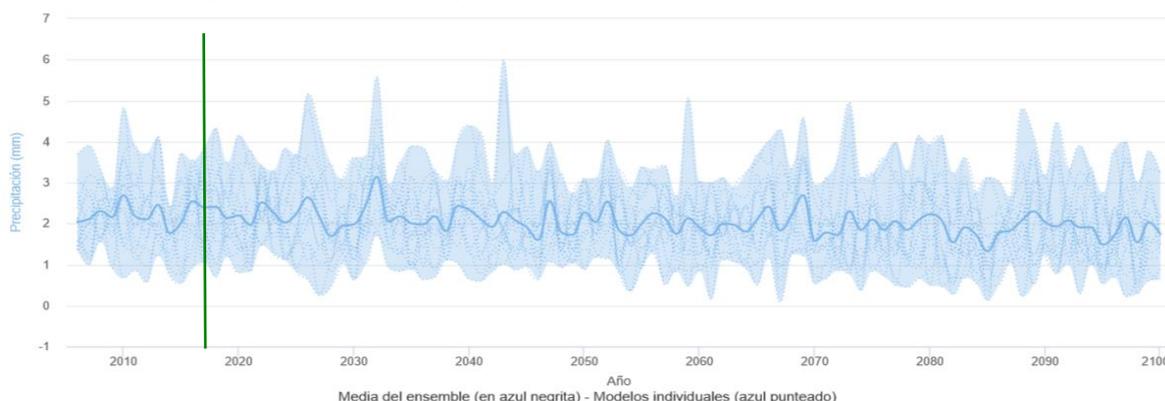


Ilustración 47: Gráfico derivado del análisis que lleva incorporado el Visor Adapteca, con la proyección de la variabilidad del parámetro Precipitación, hasta el 2100.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La envolvente de la zona inundable de la cuenca del Esgueva, basándonos en la topografía, geología (hitos impermeables, zonas de sumidero y captaciones de acuífero-río, relativamente frecuentes en este sector arenoso, (Murillo, J.M. (ed). 2013), se adjunta en la siguiente ilustración y que, básicamente se corresponde con los aluviales y vegas más fértiles del sistema del río.



Ilustración 48: Área inundable de la Cuenca del río Esgueva y que las ASPRI's han definido como de máximo riesgo, incluso para periodos de retorno excesivamente cortos.

Esta franja, ahora representada en color naranja, configura la envolvente de las inundaciones que se sucedieron desde 1924 hasta el 2000 y es sobre la que se declararon las mayores pérdidas económicas, si bien la más importante, desde el punto de vista económico y de pérdidas de vidas humanas (tres personas) es la de 1924.

Esta zona, por lo tanto, es la de mayor vulnerabilidad y sensibilidad en los municipios del río Esgueva y sobre la que se debe actuar aplicando medidas de adaptación (avenamiento, fijación de hitos y diques de defensa, etc.).

Un análisis más detallado, a mayor resolución espacial, de la zona de interés (centrado en el propio municipio, que es el que mayor concentración urbanística posee) con un Sistema de Información Geográfica (GIS), permite visualizar, por superposición de información complementaria, como es la capa topográfica, la de infraestructuras, la parcelaria (tomada del catastro), la de recursos hídricos, etc., y comprender —perfectamente— la zonificación de las zonas expuestas, vulnerables y sensibles y cuyos umbrales va a establecerse en función de los datos que el modelo aporte de volúmenes de caudales pico para cada zona y en cada secuencia, teniendo en cuenta, por supuesto, el registro histórico que puede reproducir el seguimiento que en un determinado momento se alcanzó con la cota de nivel de agua de inundación.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

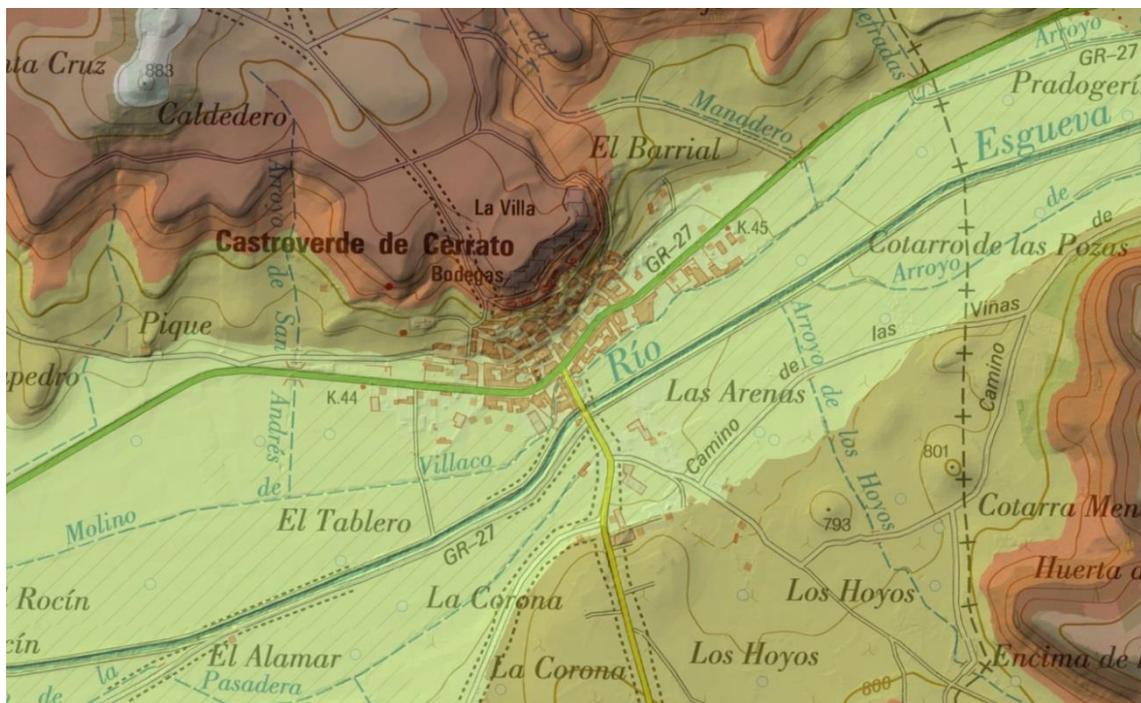


Ilustración 49: Cartografía temática de las zonas de inundación y distribución de los elementos y unidades de producción a lo largo del territorio.

La representación de las zonas urbanas, en este caso, se considera crítica, ya que una gran parte de los bienes inmuebles y de servicios se ubican en zonas de alto riesgo.

El tratamiento de estas zonas es integrar medidas de adaptación, directas, que rebajen su índice de vulnerabilidad (sistemas de drenes activos para recargas a acuíferos; avenamientos del terreno y canalizaciones oblicuas a las sección principal del cauce, con dispersión de energía de erosión y redistribución de los acarrees sedimentarios de la llanura aluvial, aterrazamientos selectivos, etc.).

La topografía, elemento esencial condicionante de la vulnerabilidad y exposición de los elementos de Protección orienta además, en este caso, sobre la evolución hidrológica del río, diferenciándose perfectamente dos terrazas (señalizadas en la ilustración 7 con dos tonos de verde) entre las dos terrazas fluviales, si bien de escaso margen de desnivel y que marcan áreas de susceptibilidad diferente.

La geomorfología apoya esta idea evidenciando que la dinámica fluvial es más activa hacia la margen izquierda del río que sobre la derecha que está en evidente proceso de asentamiento y consolidación de la llanura aluvial de la terraza más joven.

Por supuesto, la ejecución de cualquiera de las infraestructuras anteriormente expuestas debe redimensionarse de acuerdo con los datos estimados en los modelos teóricos aplicados (en los

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

que se predice un incremento de la cota de inundación, para este segmento, de unos 12 cm en 10 años).

La cartografía de riesgos, además, señala las zonas –específicas- en las que se deben abordar este tipo obras y que, de acuerdo con el mapa adjunto de la ilustración 7 se localizarían en la zona, aguas arriba, de la margen derecha, donde se asienta parte del núcleo urbano que es la que, además, de acuerdo con el fichero de Protección Civil, ha sufrido históricamente los mayores daños, si bien es menos susceptible a la vulnerabilidad debido a los procesos naturales evolutivos del río.

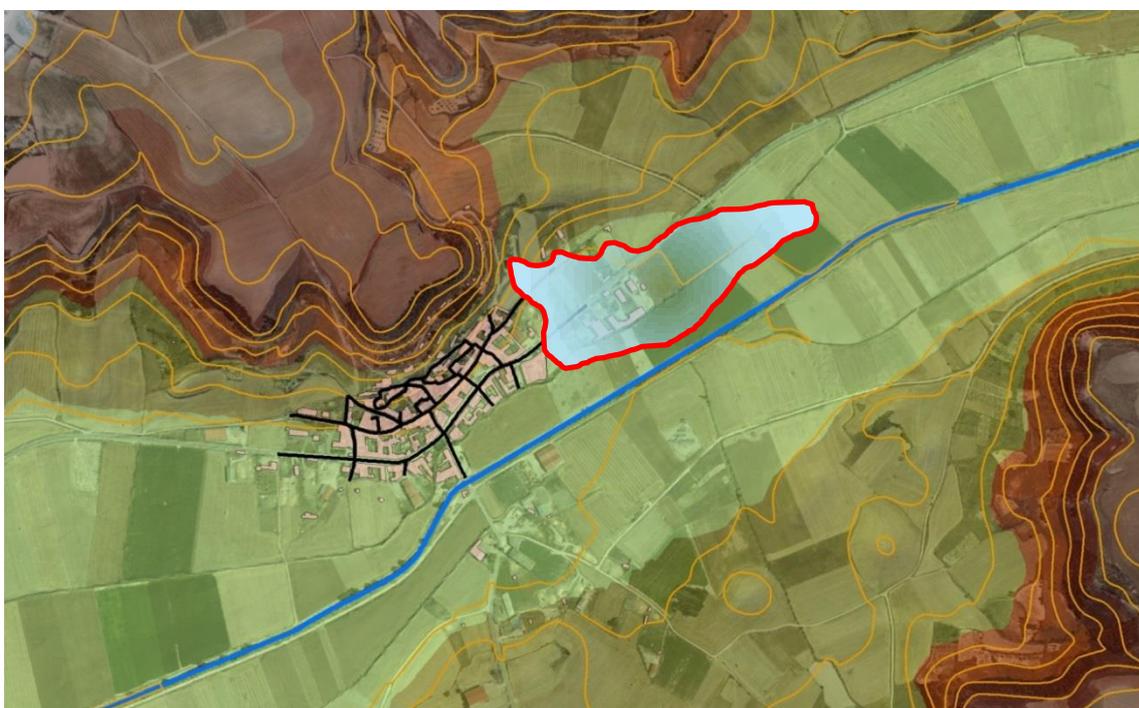


Ilustración 50: Área de actuación de los sistemas de adaptación para garantizar la seguridad y disminuir el riesgo a las avenidas e inundaciones en esta zona.

La propuesta de estudio y tratamiento ante un previsible incremento de la cota de inundación en avenidas asociadas a fenómenos extremos, para la vega de Esgueva debe fundamentar su actuación en la protección de bienes y servicios. Asumiendo que el sistema productivo es eminentemente agrícola y ganadero, sectores que tradicionalmente consumen un alto volumen de agua, permite actuar sobre el terreno para favorecer la laminación de las avenidas.

A partir del año 2000, en el Duero, y a consecuencia del desarrollo de los planes y proyectos de Inundaciones (ARPI's) se vertebró, a través de las confederaciones hidrográficas planes específicos para minimizar este tipo de eventos extremos.

Por ello, se empezó a diseñar una serie de medidas complementarias (reforestación y fijación de las riberas del río Esgueva, aterrazamientos y avenamientos de poco calado, etc.), y cuya finalidad preferente era el aprovechamiento y una gestión más eficiente de este recurso hídrico, lo que hasta ahora han permitido mantener los niveles del río en una cota razonable, pero sin considerar el incremento de las nuevas y previsibles condiciones asociadas al cambio Climático.

7.6. Conclusión

Las series históricas de precipitación de la comarca del Esgueva, su análisis topográfico, geomorfológico y los datos de modelización, considerando la predicciones que se han obtenido con la variable cambio Climático permiten generar, virtualmente, dos tipos situaciones de información cartográfica.

Por un lado, los mapas clásicos inundaciones, sin el “efecto del cambio Climático” y su correspondiente impacto y, por otra, las áreas probablemente afectadas por las estimaciones (en este caso ilustrativo, más pesimistas) que se corresponden a un escenario RCP’s 8.5.

Usando una ortofotografía como base de información espacial, (Martins, L., et al. 2016) se delimitan las áreas susceptibles de inundación (registradas y basándose en los datos hidrométricos que alimentan los modelos clásicos de inundación) y cuya área de afección se adjunta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

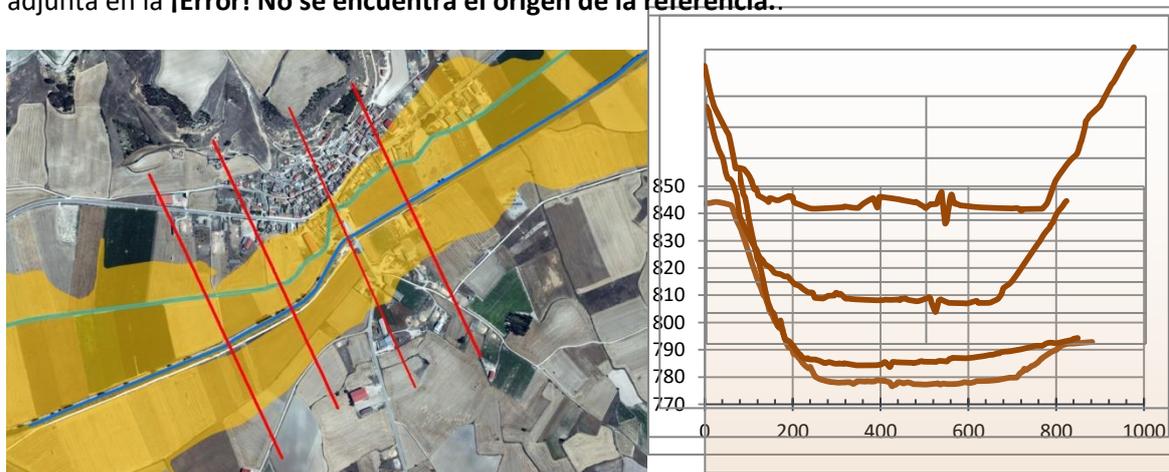


Ilustración 51: Zonas de inundación en la población de Castroverde del Cerrato, sólo considerando las variables clásicas y las series pluviométricas del AEMET. Los perfiles se corresponden a cortes topográficos para visualizar las modificaciones del terreno (avenamientos y canales).

Si se añaden las correcciones obtenidas de las predicciones que la influencia del Cambio Climático tendría sobre el recurso hídrico, en los picos de avenida y asociados a episodios extremales (lo que supondría un 7% de incremento total, irregular, de precipitación), las nuevas zonas que se verían afectadas se marcan, en morado, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Ilustración 52: El efecto, sobre el territorio, del Cambio Climático (RCP's 8.5), sobre el esgueva. Como se ve, la topografía ejerce un control estructural muy importante. A la derecha, con base en el catastro, se definen las zonas expuestas de Vulnerabilidad y Sensibilidad.

Un efecto que se constata eficaz es la modificación del terreno, a base de diques de protección y contención, espacios de avenamientos y repoblaciones forestales que hacen disminuir la energía y la dispersión de los efectos de la inundación (efecto fractal) tal y como puede constatarse si se observa la franja donde hubo tratamientos de adaptación al terreno (zona NE de Castroverde del Cerrato), si bien es cierto que este fenómeno se enmascara por la topografía dominante.

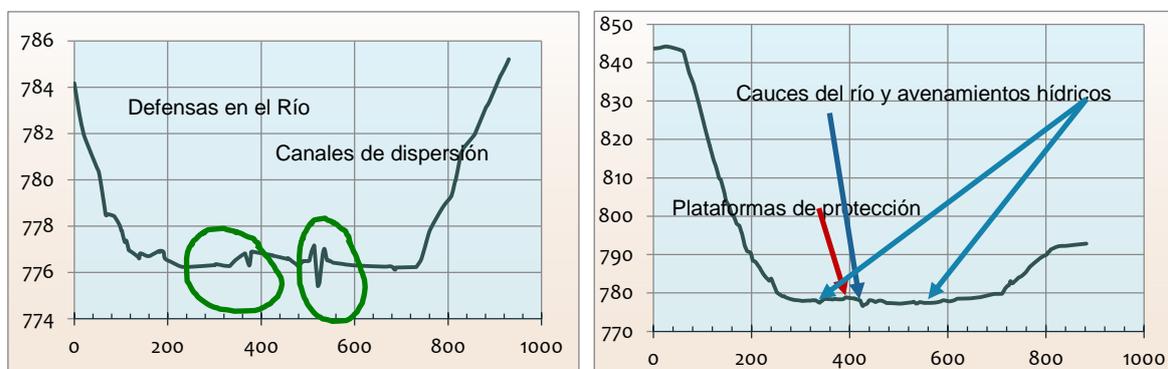


Ilustración 53: Tratamientos del terreno para minimizar los efectos de las inundaciones y afección de las zonas Vulnerables (efecto fractal).

7.7. Bibliografía

- [1] Ayala- Carcedo, F.J. 2002. "El Sofisma de La Imprevisibilidad de Las Inundaciones Y La Responsabilidad Social de Los Expertos: Un Análisis Del Caso Español Y Sus Alternativas." Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles, no. 33: 79–92.
- [2] Ballesteros, J. A., Sanchez, M., Bodoque, J. M. & Díez-Herrero, A. 2013. An Integrated Approach to Flood Risk Management: A Case Study of Navaluenga (Central Spain).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Water Resour Manage. DOI 10.1007/s11269-013-0332-1, pps 132-148.

- [3] Bodoque, J. M., Amérigo, M., Diez-Herreó, A., García, J.A., Cortés, B., Ballesteros, J.A. y Olcina, J. 2016. Improvement of Resilience of Urban áreas by Intergrating Social Perceptios in Flash-floof Risk Mangement. In Journal of Hydrology. 541, pps 665-676. <http://dx.doi.org/10.016/j.jhydrik.2016.02.005>.
- [4] Bodoque, J. M., Guardiola, C., Aroca, E., Eguibar, M.A. & Martínez, M^a L. 2016. Flood Damage Analysis: First Floor Elevation Uncertainty Resulting from LiDAR-Derived Digital Surface Models. Remote Sens. 8, 604; doi:10.3390/rs8070604. 17 pps.
- [5] Brundtland, G. H. 2017. Agua y Sostenibilidad en el Contexto del Cambio Climático. Libro Blanco de la Economía del Agua. McGraw Hill Educ. Foro III, pps. 441-445.
- [6] Caballero, I. J. 2013. Análisis de la Homogeneidad de las Series de Precipitación de Guipúzcoa. Nota Técnica nº 13 de AEMET, MAPAMA. AEMET NIPO 281-13-010-3, 119 pps.
- [7] Cantor, D.C, 2011. Evaluación y Análisis Espaciotemporal de Tendencias de Largo Plazo en La Hidroclimatología Colombiana. Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). 85 pps.
- [8] Cantor, D. y Ochoa, A. 2013. Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. Rev.Mat. Ing. 15 pps.
- [9] Cerdá E. (Coord.), Fernández, Z., Foudi, S., Galaraga, I., Martínez, A., Martínez, P., Montoya, Á.H., Nortes, D., Quiroga, S., Suárez, C. 2017. Valoración Económica de los efectos del cambio climático en España en el sector de recursos hídricos. Economía del Agua. 282 pps.
- [10] Consorcio de Compensación de Seguros. 2014. ESTADÍSTICA. Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2013. Consorcio de Compensación de Seguros. http://www.conorseguros.es/web/c/document_library/get_file?uuid=548d4f59-b6c5-40dd-b06b-98dbcefd790f&groupId=10124.
- [11] Córdoba, D. 2012. Utilización de Herramientas de Información Geográfica para la integración en Modelos Hidrogeológicos. TSM. Universidad Alcalá-Rey J.C. 67 pps.
- [12] Chuvieco, E. y Martín, M^a P. 2004. Nuevas Tecnologías para la Estimación del Riesgo de Incendios Forestales. CSIC. Instituto de Economía y Geografía. Madrid. 195 pps. NIPO: 653-04-011-6
- [13] Delacámara, G., Lombardo, F. y Díez, J.C. (coord.) 2017. Libro Blanco de la Economía del Agua. McGraw Hill Educ. 498 pps.
- [14] Díez-Herrero, A. 2004. Geomorfología e Hidrología Fluvial del Río Alberche: Modelos y

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Sig para la Gestión de Riberas. Ph.D. Tesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain.

- [15] Díez-Herrero, A.; Bodoque, J.M.; Ballesteros, J.A. y Ruiz-Villanueva, V. (2012). New Data Sources for the Climate Impact Research on the Frequency and Magnitude of Extreme Flood Events and Related Risks: dendrogeomorphological evidence. Workshop on Responses to Extreme-water Related Events, CIRCLE-2 SHARE Workshop, Madrid, Spain, November 22nd & 23rd.
- [16] Díez-Herrero, A., Fernández, L., Bodoque, J.M., Ballesteros, J.A., Ruiz, V., Sánchez, M. y García, F. 2014. El Análisis de Riesgo de Inundaciones en el Plan de Actuación Local de Protección Civil de Navaluenga (Ávila). XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres. Pgs 48-51.
- [17] Dorn, H.; Vetter, M.; Hoefle, B. 2014. Gis-based roughness derivation for flood simulations: A comparison of orthophotos, LiDAR and crowdsourced geodata. Remote Sens., 6, 1739–1759.
- [18] Estrela, T., Pérez Martín, M.A. y Vargas, E., 2012. Impacts of Climate Change on Water Resources in Spain. Hydrological Sciences Journal. 57 (6), pps 1154-1167.
- [19] Estrela, T. y Vargas, E., 2012. Drought Management Plans in the European Union. The Case of Spain. Water resources Management. 26. Pps 1537-1553.
- [20] Fernández, G., Estrela, M^a J. y Meliá, J. 2008. Predicciones de Cambio Climático y Vegetación. 1^o Seminario Wcrp-Diversitas (Comités Españoles). Museo de Ciencias Príncipe Felipe, Ciudad de las Artes y las Ciencias, Valencia. 253 pps.
- [21] Fernández, L. 2012. Las Aguas Subterráneas en la planificación hidrogeológica. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 91 pgs; Nipo 474-11-028-8.
- [22] Goulden, T.; Hopkinson, C.; Jamieson, R. Sensitivity of topographic slope and modelled watershed soil loss to DEM resolution. Remote Sens. Hydrol. 2012, 352, 345–349.
- [23] Hamed, K.H., 2008. Trend Detection in Hydrologic data: The Mann-Kendall Trend test Under the Scaling Hypothesis. Journal of Hydrology 349, 350-363.
- [24] Instituto Geográfico Nacional (IGN). 2018. Centro de Descargas del CNIG. Available online: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/> (accessed on 15 October 2018).
- [25] Laín, L., 2009. Metodología para la Elaboración de Cartografía de Peligrosidad por Avenidas e Inundaciones. Instituto Geológico y Minero de España, 326 pps.
- [26] Lavergne S., Molina, J., Debussche, M. 2006. Fingerprints of Environmental Change on the Rare Mediterranean Flora: a 115-year study. Global Change Biol. 12:1466-1478.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [27] Marcos, P. y Pulido, M., 2017. Cambio Climático y Planificación Hidrológica: ¿Es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería del Agua*, 21. 35-52.
- [28] Marcos, P. y Pulido, M., 2017. Cambio Climático y Planificación Hidrológica. Capítulo 13. Libro Blanco de la Economía del Agua. McGraw Hill Ed. pps. 165-79.
- [29] Matheron, G. *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*; École National Supérieure des Mines: Paris, France, 1971.
- [30] Martins, L., Diez-Herrero, A., Bodoque, J.M. y Bateira, C. 2016. Estimación de los Tiempos de Concentración: Implicaciones de la Simplificación Morfométrica en el Análisis Hidrológico de Caudales de Avenida Fluvial. XIV Reunión Nacional de Geomorfología. Málaga pps 375-381.
- [31] Miró, J.J.; Estrela, M. J. y BARBERÁ, M. J. 2013. Análisis de Tendencias de Series Diarias de Temperatura a Partir de un Downscaling Estadístico con Datos de Reanálisis y Redes Neuronales. Aplicación a La Comunidad Valenciana. Doc. Inter, Comunitat, Valenciá. pps 549-60.
- [32] Moya, B. V., Hernández, A.E. y Borrel, H. E. (2005). Los Humedales ante el Cambio Climático. *Investigaciones Geográficas*, nº 37 (2005) pp. 127-132 Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante. ISSN: 0213-4619.
- [33] Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J. F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Steven, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J. P. & Wilbanks, T.J. 2010. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature* 463: 747-756. doi:10.1038/nature08823
- [34] Murillo, J.M. (ed). 2013. Las Aguas Subterráneas y la Red Natura 2000. IGMW DGA. 438 pps
- [35] Navarro, J. A., Goberna, M., González, G., Castillo, V. M. y Verdú, M. (2017). Restauración Ecológica en Ambientes Semiáridos. Recuperar las Interacciones Biológicas y las Funciones Ecosistémicas. CSIC. Pps 162. NIPO: 059-17-056-9.
- [36] O'Neil, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M. & Solecki, W. 2015. The Road Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathway describing World Futures in the 21st Century. *Global Environmental Change*. 42: 169-180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- [37] Parolo G. & Rossi G. 2008. Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps. *Basic and Applied Ecology* 9: 100-107

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [38] Pulido, M., Cabrera, E. y Garrido, A. 2014. Economía del agua y gestión de recursos hídricos Ingeniería del Agua. Vol. 18.1.ps. 99-110.
- [39] Qi, Honghai, Pu Qi, and M. S. Altinakar. 2013. "GIS-Based Spatial Monte Carlo Analysis for Integrated Flood Management with Two Dimensional Flood Simulation." *Water Resources Management* 27 (10): 3631–45. doi:10.1007/s11269-013-0370-8.
- [40] Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neil, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo, J., Samir, K.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masur, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze, H., Obersteiner, M. Tabeau, A. y Taavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. *Global Environm Change*. Vol. 42, Pgs 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- [41] Rodríguez, L., Fernández, M., Hernández, J.A., Murillo, J.M. y López, J.A. 2016. Programa RENATA (Natural Recharge to Aquifers). Edita IGME-Diputación de Alicante. 83 pps.
- [42] Salgot, M. 2017. Energía y Agua. Guía Técnica de Energía y Medio Ambiente. Edita: Fundación Gas Natural Fenosa. 153 pps. ISBN: 978-84-617-9044-9
- [43] Seiller, G., Anctil, F., Perrin, C., 2012. Multimodel Evaluation of Twenty Lumped Hydrological Models under Contrasted Climate Conditions. *Hydrol Earth Syst, Sci.* 16. Pps 1171-1189.
- [44] Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE). Available online: <http://www.siose.es> (accessed on 10 September 2018).
- [45] Stocking, M.A. & Murnaghan, N. 2001. Handbook for the field Assessment of land degradation. Earthscan Publications, London 325 pps
- [46] Torregrosa, M^a T. 2007. El Modelo Socioeconómico de Gestión de los Recursos Hídricos en la Comarca de la Marina Baja (Alicante), un Enfoque de Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Tesis Doctoral. Universitat d'Alacant, 531 pps.
- [47] Thirel, G. Andréassian, V., & Perrin, C., 2015. On the Need to Test Hydrological Models under Changing Conditions. *Hydrological Sciences Journal*. 60 (7-8). Pps 1165-1173.
- [48] van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. Riahi, K., Thomson A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. & Rose, S. K. 2011. The Representative Concentration Pathway: An Overview. *Climate Change* 109:5-31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.
- [49] VVAA. 2017. Cuadernos de Estrategia 193. El Cambio Climático y su Repercusión en la

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Defensa. Instituto Español de estudios Estratégicos. Iberdrola. Edita. Ministerio de Defensa. 280 pps. NIPO: 083-17-182-8.

[50] VVAA. 2000. El libro Blanco del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría general Técnica Ministerio de Medio Ambiente. I.S.B.N.: 84-8320-128-3 NIPO: 310-00-009-3

8. LA TELEDETECCIÓN APLICADA EN AGRICULTURA

Pedro Oñorbe de Torre. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM).

8.1. Teledetección.

La teledetección es el sistema de obtener información de un objeto sin tener contacto físico con él. Un objeto recibe energía, toma la que en ese momento más necesita y refleja el resto, por tanto, el análisis de la energía reflejada nos proporciona información de la naturaleza del objeto y de su estado en ese momento.

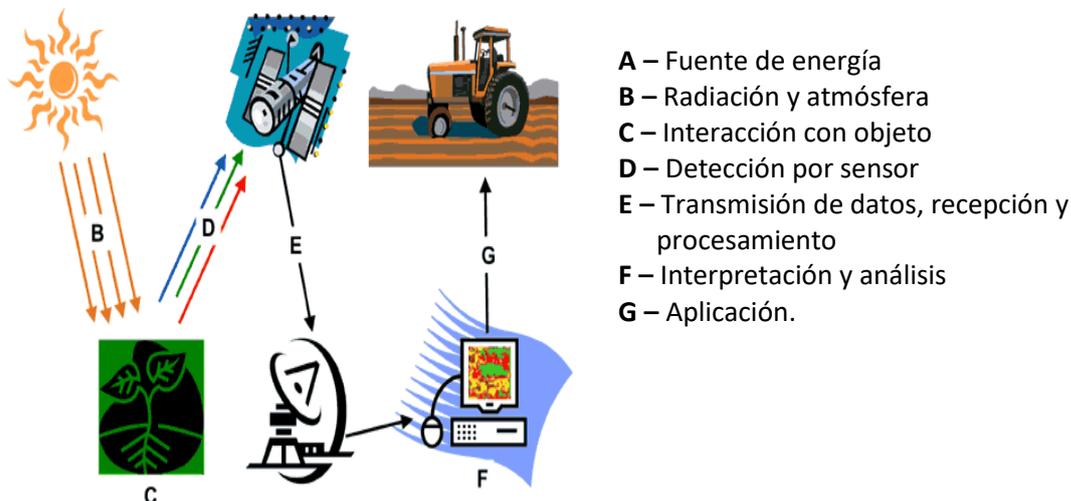
8.1.1. Fases en la teledetección. El espectro electromagnético.

Fases de la teledetección.

Las fases en la teledetección son:

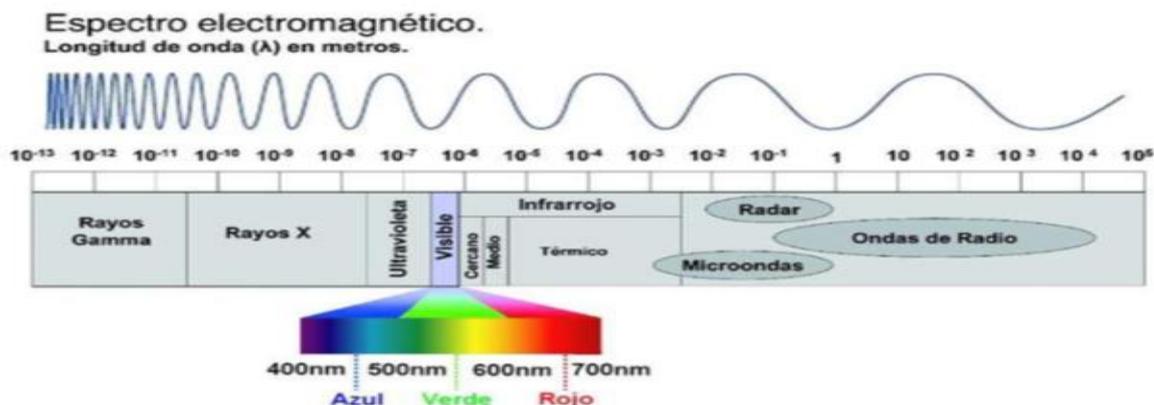
- Fuente de emisión de energía.
- Generalmente suele ser el sol pero puede haber otros equipos emisores como radar, sonar, rayos X, microondas, infrarrojos, ultravioletas etc.
- Transferencia de energía hasta el objeto a analizar.
- Interacción con el objeto.
- Energía reflejada y captación por sensor.
- Transmisión de datos, recepción y procesamiento.
- Interpretación y análisis.
- Aplicación

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



El espectro electromagnético.

La energía se transmite en diversas longitudes de onda y es misión de la teledetección determinar e interpretar las longitudes de onda de la energía reflejada que son características intrínsecas de la situación puntual de cada objeto.



Como se observa en la imagen, la parte del campo electromagnético en la sección óptica (visible por el ojo humano) es una parte muy pequeña del campo total, por lo que cada vez aparecen más sensores capaces de captar energía reflejada en otros sectores, especialmente el infrarrojo (cercano y lejano) y el ultravioleta. La radiación gamma, por su pequeña longitud de onda y su gran poder de penetración, no es utilizada en teledetección, excepto en temas de investigación de laboratorio.

8.2. Usos de la teledetección en agricultura

Uno de los usos más extendidos de la teledetección es la aplicación en “agricultura de precisión” en la que la información se utiliza en muy diversos campos, entre los principales mencionamos:

- Información cartográfica de parcelas, georreferenciación y modelos de terreno 3D
- Información audiovisual de propaganda
- Información meteorológica
- Información específicamente agraria.
 - Tipos de suelos (edafología)
 - Índices agronómicos, cuyo objetivo es minimizar costes en agua de riego, fertilizantes y fitosanitarios.
 - Presentación de informes obligatorios para controles de producción.
 - Información para solicitud de ayudas de financiación pública.
 - Aplicación de nuevas tecnologías como lidar o radar

La información a través de los sensores capaces de medir la radiación electromagnética reflejada por la superficie de la tierra y su vegetación a distintas escalas tanto espaciales como de resolución temporal.

La radiación reflejada varía según tipo de suelo, proporción de suelo cubierto de vegetación, proporción de carga foliar, estado fenológico, humedad de suelo o estrés hídrico de la planta.

La radiación reflejada no es uniforme sino que depende de la inclinación de la iluminación (distintas horas), zona soleada o en umbría.

La interpretación de esta información nos permitirá clasificar características biofísicas de cada pixel de cada imagen.

Estas características biofísicas se clasifican a través de diversos índices utilizados en agricultura de precisión.

8.2.1. Índices utilizados en agricultura de precisión

Denominamos índices de vegetación a la interpretación de la respuesta de energía reflejada en distintas bandas espectrales que son características específicas de cada planta y cada situación. Existen muchos índices por lo que solo mencionamos los más usados.

- **NDVI:** El más utilizado es el NDVI (Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado).

El NDVI se construye con la respuesta en el “borde rojo”, típica de la absorción de la

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

clorofila (alrededor de 660 nm y que aparece como zona oscura) y la alta reflectancia de los tejidos vegetales en el infrarrojo próximo (alrededor de 800 nm y que aparece como área brillante).

$NDVI = (NIR-R) / (NIR+R)$ tomados los valores de radiación en su expresión unitaria.

Por tanto su entorno está entre -1 y +1

Este índice cuantifica la actividad fotosintética y es representativo del vigor vegetativo.

Un NDVI de 0,15 es típico de un suelo agrícola desnudo, valores entre 0,2 y 0,7 son típicos de prados y zonas de diversas plantaciones, valores de 0,8 a 0,9 son típicos de una cobertura vegetal muy densa como bosques de zonas templadas y tropicales. Los índices NDVI negativos corresponden a áreas sin actividad vegetativa como agua o nieve.

- **LAI:** Índice de Área Foliar. Este índice trata de relacionar el área ocupada por hojas en la copa del árbol respecto al área correspondiente en suelo. Tiene que ver con la actividad vegetativa, por lo que tiene similitudes de función con el NDVI.
- **CWSI:** Índice de Estrés Hídrico (Crop Water Stres Index). Este índice precisa de uso de cámaras térmicas para detección de temperaturas tanto foliar como de suelo y trata de relacionar el vigor vegetativo con las temperaturas para determinar las distintas necesidades de agua en distintas zonas de cultivo tratando de optimizar el uso de agua de riego.

La zona de respuesta térmica entra dentro del sector del infrarrojo lejano.

8.3. Toma de datos

La toma de decisiones de optimización de cultivos exige la toma de datos tanto sobre parcela como sobre cultivos.

Esta toma de datos precisa de sensores o cámaras de recepción y selección de los parámetros de medida así como de los equipos portantes de los mismos.

8.3.1. Equipos portantes

Las cámaras pueden ir instaladas en satélites, vehículos aéreos tripulados o en vehículos terrestres o en la propia tierra.

8.3.2. Satélites

La toma de datos desde satélites es la más utilizada por su repetitividad, facilidad de acceso, disponer de históricos de las parcelas.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Existen multitud de satélites, unos gratuitos y otros de pago, con distintos objetivos, desde cartografía hasta información de parcelas, cultivos, situación meteorológica.

Las imágenes de satélites tienen resoluciones de hasta 5 m por pixel en los gratuitos y de hasta 20 cm en algunos de los de pago.

Principales satélites utilizados en agricultura y su precisión

Algunos ejemplos de satélites:

- De imágenes gratuitas:
 - **Serie Europea Copérnicus (Sentinel).** Probablemente la serie más completa.
Sentinel 1A y 1B radar, puede trabajar de noche, resolución entre 5 y 20m. # Sentinel 2A y 2B, imágenes multispectrales con resoluciones hasta 5m. Muy utilizados en agricultura, trabajan en óptico e IR cercano # Sentinel 3A y 3B, múltiples sensores, especializado en topografía terrestre y marina # Sentinel 4 y 5 embarcados como carga útil en satélites Meteosat, especializados en monitoreo.
 - **Landsat 7 y 8,** también muy utilizado en agricultura, multispectral trabajando en óptico, iR cercano y térmico (IR lejano). Con resoluciones entre 15 y 30m.
 - **Meteosat.** Serie europea de observación de la atmósfera.
- De imágenes de pago:
 - **Digital Globe:** World View 1, 2, 3 y 4 (antes denominado GeoEye 2), multispectral con resoluciones hasta 0,35m # Quick Bird 2 con resolución hasta 0,6m en pancromático y 2,5m en multispectral.
 - **PAZ,** satélite español radar, puede trabajar de noche y en días nublados, resolución de hasta 2m, pudiendo afinar en posprocesado hasta 0,2m.
 - **Deimos 2,** satélite desarrollado por la empresa española Elecnor-Deimos, vendido a Urthe Cast en 2015 y es comercializado por Deimos Imaging, capta imágenes en óptico y en IR cercano con resolución de hasta 0,3m.

Serie SPOT 5, 6 y 7. Serie puesta en órbita por Airbus, capta imágenes en óptico y en IR cercano y puede hacer modelados de terreno 3D.

Sensores en satélites

Tal como se ha expresado anteriormente las cámaras incorporadas en satélites son básicamente ópticas y multispectrales trabajando éstas últimas en el IR cercano y el térmico (IR lejano).

Últimamente están incorporándose cámaras radar de apertura sintética que pueden trabajar en días nublados y serán muy útiles en países subtropicales en los que la pluviometría es intensa.

RUMBO 20.30.

26
NOV

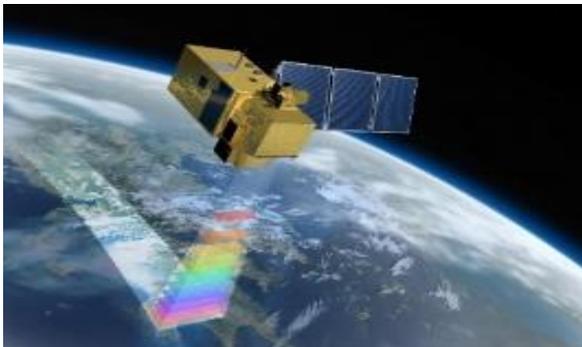
29
NOV

CONAMA 2018
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



SATELITES EN ÓRBITA



SENTINEL 2A y B



SENTINEL 3A y B



SENTINEL 5



SENTINEL 6

RUMBO 20.30.

26
NOV

29
NOV

CONAMA 2018
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



METEOSAT 1



LANDSAT 7



LANDSAT 8



WORLD VIEW 2



QUICKBIRD



DEIMOS 2



SPOT 5



SPOT 6 Y 7



PAZ

8.3.3. Vehículos aéreos tripulados

Los vehículos aéreos tripulados tienen la ventaja de su gran autonomía, su velocidad y mayor precisión que los satélites pero toman datos a mayor distancia que los drones.

8.3.4. Drones

El dron es equipo esencial para la toma de datos cuando es necesaria una precisión muy alta o cuando es necesario tomar puntos concretos.

Pueden transportar muy diverso tipo de cámaras e intercambiarlas según la misión. Utilizamos dos tipos de drones:

- De ala giratoria. Permiten acercarse mucho al objetivo por lo que su precisión es alta (2 a 20 cm/pixel), velocidad baja y tiempo de permanencia del orden de 20 min.
- De ala fija, con mayor velocidad y mayor tiempo de permanencia (del orden de 2 horas para equipos con motor eléctrico y de 8 horas con motor térmico). Menor precisión, del orden de 50 cm/pixel.

Normalmente se combinan los estudios de imágenes de satélite con las de drones y las de equipos de tierra

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



ALA FIJA



A LA ROTATORIA



MOTOR DE EXPLOSIÓ

8.3.5. Equipos de tierra

En muchos casos es interesante repetir periódicamente la toma de datos por lo que tener disponibles los sensores permanentemente es una ventaja.

Actualmente se está incrementando el montaje de sensores en los propios aperos agrarios aprovechando que ya están operativos en la zona, las conclusiones después de posprocesado y recomendaciones se pueden nuevamente introducir en el apero, dotándolo de equipos de velocidad variable para que puedan aplicar automáticamente las recomendaciones técnicas.

También se usan frecuentemente sensores implantados directamente sobre el terreno, especialmente para medida de estrés hídrico.

8.3.6. Cámaras

Como hemos comentado los tipos de cámaras utilizados pueden ser:

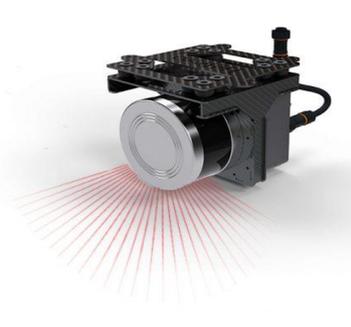
- Ópticas.
- Multiespectrales, con varias bandas de observación.
- Hiperespectrales, con múltiples bandas y por tanto más difíciles de calibrar.
- Radar, toma de datos independientemente de nubosidad.
- Lidar, toma de datos 3D para modelado de terrenos y medidas a varias alturas (copa-tronco-suelo).



CAMARA MULTIESPECTRAL



CAMARA HIPERESPECTRAL



CAMARA LIDAR H16

8.3.7. Sistemas de control

Los sistemas de control de drones tienen clara tendencia a automatizar su control desde bases cada vez más lejanas por lo que la legislación pretende que siempre haya una persona responsable a distancia visual.



CABINAS DE CONTROL REMOTO

8.4. Traspaso de datos

Una vez completada la toma de datos es preciso transmitirlos para su posprocesado. Este traspaso puede hacerse directamente desde los equipos receptores o bien acumularlos en campo para su traspaso posterior.

8.4.1. Acumuladores de datos

En el caso de sensores implantados en tierra es necesario agruparlos en lo que denominamos "acumuladores de datos o data logger".



DATA LOGGER DE BYNSE

8.4.2. Trabajo en la nube. Big-data

Los objetivos de los estudios de agricultura de precisión podemos agruparlos en:

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Cuaderno del agricultor.
- Optimización de agua de riego.
- Optimización de uso de fertilizantes.
- Optimización de uso de fitosanitarios.
- Estudio de suelo y adecuación de plantaciones.
- Detección temprana de enfermedades y plagas.
- Inventarios y calidad de los cultivos.
- Conteo de plantaciones.
- Documentación para relaciones con la administración.
- Rentabilidad de los cultivos.
- Peritación de cultivos para seguros.

Estos objetivos precisan correlacionar los datos obtenidos en parcela con otros datos como los catastrales, meteorológicos, costes de inputs, precios de venta, etc, tomados de “la nube”, lo cual supone trabajar con una ingente cantidad de datos que será necesario seleccionar y aprovechar correctamente.

Entramos en el campo del uso “big data”

8.5. Posprocesado

Una vez recopilados todos los datos lo más general es volcarlos sobre una “plataforma GIS” que nos permita trabajar sobre ellos. Estas plataformas amplias suelen denominarse “webGIS” y hay una gran cantidad de ellas.

8.5.1. Las plataformas gis utilizados en agricultura

Los más usuales son los proporcionados por el Ministerio de Agricultura de forma gratuita y las variantes utilizadas en las Autonomías SIGPAC (para gestión de las ayudas PAC), SIAR (para gestión de regadíos, SIGA (gestión de datos agrarios).

Entre las más utilizadas en España:

- SPIDER desarrollado por la Universidad de Castilla la Mancha y comercializado por AGRISAT.
- CROPTI.
- AGRICOLUM.
- BYNSE.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Las secciones agrícolas de las plataformas genéricas ARCGIS, QGIS, WEBGIS O GRASSGIS.

Dentro de las funciones ofrecidas por estas plataformas hay una parte genérica (de costo muy reducido) de la gestión de relaciones con la Administración y los cálculos de producción-coste-beneficio y que se van complicando a medida que se pretende aplicaciones de agricultura de precisión, para lo que es necesario el apoyo de empresas especializadas.

Uno de los objetivos importantes es la entrega de resultados al agricultor en forma clara fácilmente comprensible y que pueda gestionarse de forma eficaz. Cada vez es más utilizado los servicios que pueden gestionarse desde APP.

Existen otros GIS específicos relacionados con agricultura como son los relativos a gestión forestal, ganadería, piscicultura, gestión cinegética o compra venta de fincas.

8.6. Resumen de últimas tendencias

Resumimos las tendencias actuales que hemos mencionado:

- Aumento continuo del número de satélites, sus imágenes y precisión.
- Nuevas cámaras y sensores tanto para satélites como para drones con reducción de tamaños y de costes y para mediciones muy variadas (gases, vibraciones, peso, elementos como N o P).
- Mayor automatización en la presentación de resultados.
- Interconexión con otros agentes del mercado como son los bancos con departamentos agrarios, empresas de seguros o fabricantes de maquinaria agraria interesados en la automatización de actuaciones.
- Control de drones en automático y en remoto.
- Financiaciones públicas para la gestión agraria tanto en nuevos desarrollos como en la expansión en el ámbito rural.
- Mencionamos especialmente las actuaciones en programas H2020 o similares, las de los Bancos de Desarrollo Rural en Latinoamérica o la FAO de las NN.UU.

8.7. Curiosidades

Cerramos con algunas curiosidades

- El dron más grande y el más pequeño
El X47 (18 tm)

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



y el “Mosquito” (apenas 3 cm)

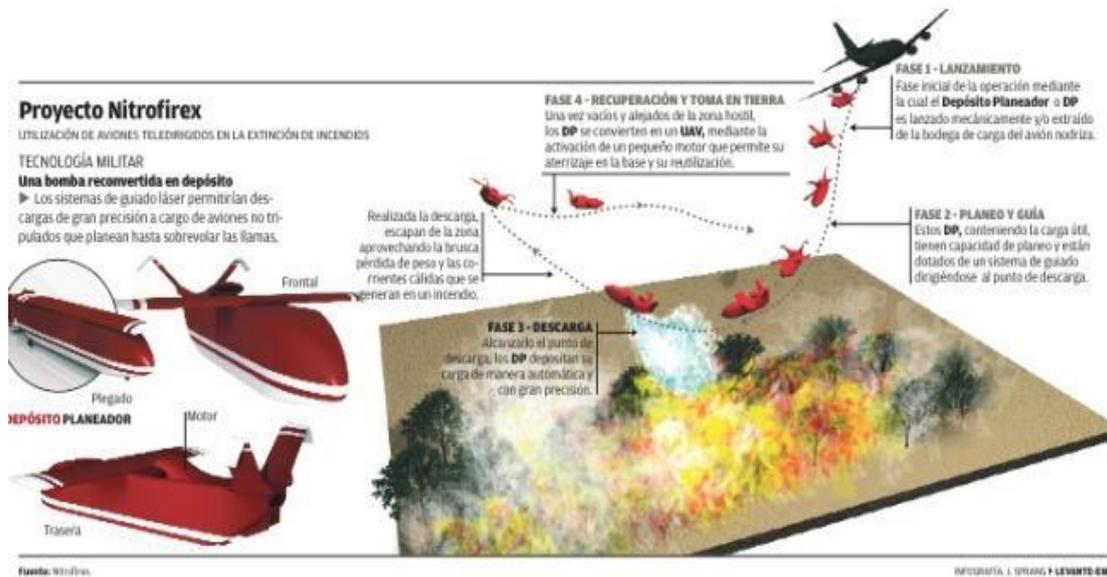


- Desarrollo de un dron para atmósfera ATEX 0 neumático desarrollado por SJT



TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Proyecto Nitrofirex para lucha anti-incendios forestales nocturna



- Desarrollos de drones bajo agua (ROV) para inspecciones subacuáticas



9. ANTENAS MULTI-HAZ EN TECNOLOGÍA IMPRESA PARA PLATAFORMAS A GRAN ALTURA

José Daniel Martínez de Rioja del Nido, Eduardo Martínez de Rioja del Nido, José Antonio Encinar

Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

9.1. Resumen

Las antenas reflectoras planas en tecnología impresa, conocidas como antenas reflectarray, combinan algunas de las principales características de los reflectores parabólicos y las agrupaciones de antenas, constituyendo una alternativa interesante para comunicaciones a larga distancia en las que se requiere de antenas de alta ganancia. Aparte de tener un proceso de fabricación sencillo y de coste reducido, son ligeras de peso y fáciles de desplegar. Su superficie plana facilita su integración en la estructura de una aeronave o de un satélite, así como su posterior despliegue. En este trabajo, se estudia su posible utilización en aeronaves estratosféricas, también denominadas plataformas a gran altura, como antenas multi-haz capaces de proporcionar cobertura celular en la banda de 30 GHz.

9.2. Las comunicaciones mediante plataformas a gran altura (HAPS)

El concepto de plataforma a gran altura, también conocido como HAPS por sus siglas en inglés (*High Altitude Platform Station*), se utiliza para referirse a un dron o vehículo aéreo situado a una altura de entre 20 y 25 km sobre la superficie terrestre (en la región estratosférica de la atmósfera), que desempeña un papel similar al de un repetidor o estación base en un sistema de comunicaciones [1]. Los HAPS están considerados desde hace algunos años como una tecnología alternativa para proporcionar servicios de radiocomunicación, caracterizándose por unos retardos de propagación y pérdidas mucho menores que los de un sistema de comunicaciones por satélite. Las aplicaciones potenciales de los HAPS son muy numerosas, abarcando desde los servicios de radiodifusión y el acceso a Internet de banda ancha hasta los sistemas de vigilancia o teledetección de banda estrecha [2].

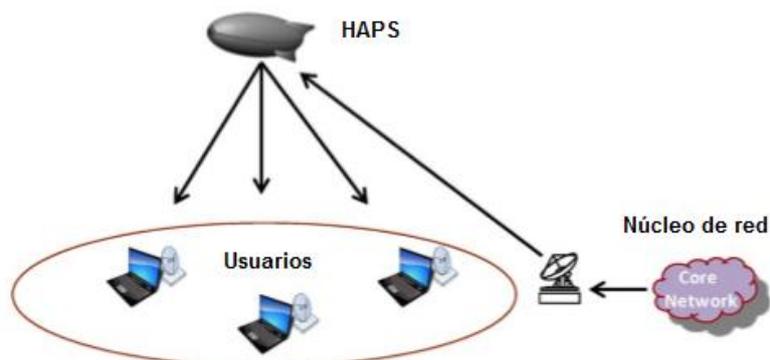


Ilustración 54: Esquema de sistema HAPS encargado de proporcionar cobertura (servicio temporal o permanente) a una cierta área [2].

La estratosfera es la segunda capa de la atmósfera, situada entre la troposfera y la mesosfera, y se extiende aproximadamente desde los 17 km hasta los 50 km de altitud sobre la superficie terrestre. La ubicación de los HASP en la parte baja de la estratosfera, entre los 20 y los 25 km de altitud, obedece a una razón concreta. La velocidad del viento en esta zona es de sólo unos pocos m/s, contrastando con los más de 40 m/s que pueden alcanzarse tanto en la parte alta de la troposfera como en la de la propia estratosfera (ver Fig. 1-2). Esto permite lograr una mayor estabilidad de la aeronave, haciendo más fácil el control de su posición. Además, el situarse en torno a los 20 km de altitud permite evitar las rutas de tráfico aéreo comercial.

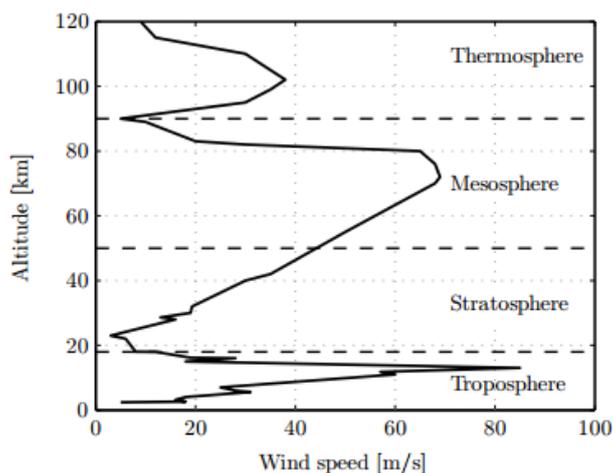


Ilustración 55: Velocidad del viento (m/s) respecto a la altura sobre la superficie terrestre (km) [3].

Aunque los primeros proyectos de sistemas HAPS emplearon aviones tripulados, la larga duración de los vuelos y las condiciones extremas a 20 km de altitud llevaron rápidamente a la utilización de vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAVs*). Los tres tipos más comunes de aeronave utilizados como HAPS son los aeroplanos, los dirigibles y los globos aerostáticos. Cada uno de ellos cuenta con unas características distintas que lo hacen más

apropiado para cierto tipo de aplicaciones. Algunos ejemplos de aeronaves utilizadas como HAPS en proyectos reales se muestran en la Fig. 1-3.



Ilustración 56: Distintos ejemplos de aeronaves utilizadas como HAPS [4].

Los globos aerostáticos tienen el inconveniente de que su posición depende de las condiciones meteorológicas, por lo que no pueden utilizarse para prestar servicios de alta disponibilidad, siendo más adecuados para comunicaciones de emergencia. A cambio, su coste es menor que el del resto de alternativas y son relativamente sencillos de manejar. Los aeroplanos representan una solución intermedia en cuanto a coste, consumo de energía y capacidad ofrecida a los usuarios, que puede ser interesante para prestar servicios de acceso radio e Internet en entornos rurales o con poca densidad de población. Por último, los dirigibles son plataformas de gran tamaño y coste elevado, pero que permiten ofrecer servicios de banda ancha y alta capacidad a los usuarios.

9.2.1. Arquitecturas de red y regulación

Las principales infraestructuras de telecomunicaciones que suministran servicios de banda ancha y estrecha son las redes terrestres y los sistemas de comunicaciones por satélite. Los HAPS pueden considerarse como una solución intermedia a las anteriores, con las que comparten algunas características. La Tabla 1 presenta una comparativa entre los tres sistemas (satélites, redes terrestres y HAPS).

Característica	Satélites	Red terrestre	HAPS
Coste	Alto	Bajo	Intermedio
Tiempo de despliegue	Lento	Lento	Rápido
Retardo de propagación	Alto	Bajo	Bajo
Pérdidas del enlace	Altas	Bajas	Bajas
Área de cobertura	Grande	Pequeña	Intermedia

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Mantenimiento y actualización	Difícil	Fácil	Fácil
-------------------------------	---------	-------	-------

Ilustración 57: Comparativa entre redes terrestres, satélites y HAPS.

Existen distintos tipos de arquitecturas de red y escenarios de servicio en los que los HAPS podrían tener un papel destacado, operando tanto de forma independiente como integrados en sistemas terrestres, por satélite o en constelaciones de múltiples HAPS. Una configuración de red basada en HAPS operando de manera independiente, como la mostrada en la Fig. 1-1, permitiría proporcionar acceso inalámbrico a los usuarios de manera similar a como lo haría una estación base en una red terrestre. Las principales aplicaciones de estas redes podrían ser las comunicaciones de emergencia, eventos deportivos, culturales o de negocios multitudinarios, etc. En estos casos, los HAPS se conectarían al núcleo de red del operador de comunicaciones mediante un enlace de troncal o de *gateway*.

Para poder incrementar la capacidad y el área de cobertura de la red, pueden emplearse sistemas de múltiples HAPS conectados a través de una estación base terrestre o mediante enlaces directos entre ellos. Este último escenario presenta una complejidad mayor a nivel de sistema, pero a cambio ofrece una mayor flexibilidad en la gestión y configuración de la red. En algunos casos, se ha llegado a proponer la utilización de múltiples HAPS para cubrir una misma área geográfica, explotando las técnicas de discriminación espacial para mejorar la calidad del servicio y aumentar la capacidad ofrecida a los usuarios [2].

La integración de los HAPS en las redes terrestres puede tener un papel importante en el desarrollo de los sistemas móviles 4G y 5G. En este tipo de escenarios, existen varios aspectos que deben ser tenidos en cuenta por el operador: interferencias entre HAPS y estaciones base, incremento de la capacidad de la red, estrategias de asignación de recursos, rendimiento, etc. La evolución de los sistemas de acceso inalámbrico hacia redes heterogéneas formadas por pico- y femto-celdas llevaría a la utilización de HAPS para proporcionar el enlace de soporte con el núcleo de red, o para servir de punto de acceso WiFi a usuarios aislados.

Por último, la integración de los HAPS, las redes terrestres y los satélites en un sistema heterogéneo sería la alternativa más interesante para proporcionar conectividad global y servicios de banda ancha a los usuarios. Un ejemplo de esta arquitectura de red puede verse en la Fig. 1-4. La integración de las tres infraestructuras en una misma red permitiría aprovechar las ventajas de cada una de ellas; sin embargo, existen aspectos importantes a tener en cuenta: disponibilidad de espectro, interfaces adecuadas entre unas redes y otras, calidad de servicio, protocolos de acceso, etc.

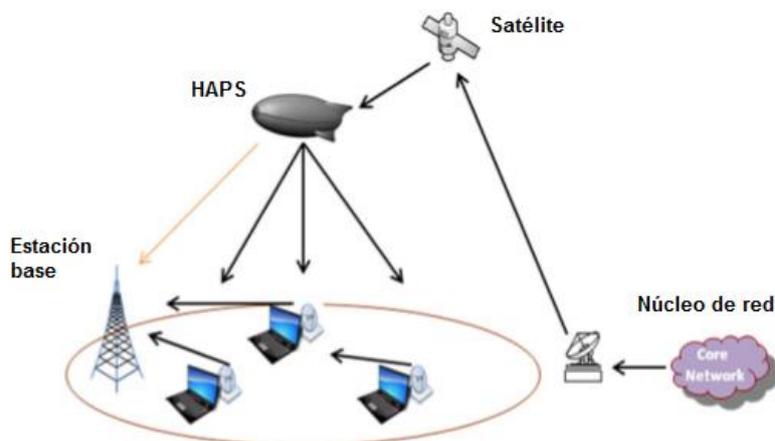


Ilustración 58: Esquema de integración de redes terrestres, satélites y HAPS para proporcionar conectividad global [2].

En cuanto al marco regulatorio, las frecuencias asignadas por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones para los servicios proporcionados por los HAPS son las siguientes:

- Banda de 2.1 GHz: hasta 50/60 MHz de ancho de banda en el enlace de usuario para proporcionar servicios de 3G, compartida con los sistemas IMT-2000 [5].
- Banda de 28/31 GHz: 300 MHz en cada dirección (transmisión entre 27.9-28.2 GHz y recepción entre 31-31.3 GHz) para proporcionar servicio fijo de banda ancha (datos, voz y vídeo), compartida con satélites y redes terrestres [6].
- Banda de 47/48 GHz: 300 MHz en cada dirección (recepción entre 47.2-47.5 GHz y transmisión entre 47.9-48.2 GHz), compartida con satélites [7].

Recientemente, la ITU ha propuesto la asignación de las bandas de 24.2-27.5 GHz y 38-39.5 GHz para servicio fijo proporcionado mediante HAPS, en un intento de hacer frente a la demanda creciente de nuevos servicios de banda ancha [8]. En este trabajo, nos centraremos en la banda de 28/31 GHz, que utilizaremos para proporcionar cobertura celular desde un HAPS mediante un esquema de reutilización de frecuencia y polarización de cuatro colores. Una de las principales razones para elegir esta banda son las mejores condiciones de propagación que presenta con respecto a la banda de 47/48 GHz.

9.2.2. Antenas para HAPS

El diseño de antenas para HAPS debe tener en cuenta el tipo de aplicación y la banda de frecuencias de operación. Un servicio de radiodifusión requerirá de antenas de media o baja ganancia que proporcionen haces conformados o poco directivos para cubrir una amplia zona de terreno, mientras que las antenas de alta ganancia serán más apropiadas para proporcionar cobertura celular mediante la generación de un número elevado de haces estrechos. En cualquier caso, las antenas para HAPS deben compartir una serie de características básicas,

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

como son: bajo consumo de potencia, alta eficiencia de radiación, bajo nivel de lóbulos secundarios, y peso y tamaño reducidos [1].

En este trabajo nos centraremos en la generación de haces múltiples para proporcionar cobertura celular desde un HAPS, lo que permitiría incrementar la capacidad de la red gracias a la reutilización de frecuencias y de polarizaciones. Los actuales sistemas de comunicaciones por satélite en la banda Ka (20/30 GHz) emplean una estrategia similar para ofrecer servicios de banda ancha y alta capacidad de datos, combinando dos frecuencias y dos polarizaciones para generar una cobertura celular con un esquema de cuatro colores y celdas dispuestas según un patrón hexagonal [9].

Una solución bastante simple para obtener la cobertura multi-haz podría ser la utilización de una agrupación de bocinas, en donde cada bocina generase un haz (ver Fig. 1-5). Las bocinas son antenas de ganancia media o baja, por lo que generan haces relativamente anchos. Por ello, esta configuración podría ser aplicable en entornos suburbanos o rurales, donde la baja densidad de población permitiría aumentar el tamaño de las celdas, de manera que la antena tuviese que generar haces anchos con una separación relativamente grande. En cualquier caso, los inconvenientes de esta configuración serían el elevado peso de la agrupación de bocinas y su falta de flexibilidad.



Ilustración 59: Bocinas para HAPS [10].

Los reflectores podrían ser una alternativa interesante para el diseño de antenas multi-haz embarcadas en HAPS. Permiten generar haces más directivos que las bocinas que darían lugar a celdas de menor tamaño sobre la superficie terrestre. El mecanismo de alimentación, mediante una bocina, es sencillo y presenta pocas pérdidas. La generación de haces múltiples se llevaría a cabo iluminando el reflector con varias bocinas. El inconveniente de los reflectores vendría por su difícil integración en el vehículo estratosférico (superficie doblemente curvada), así como por el posible bloqueo producido por las bocinas alimentadoras, que obliga a utilizar configuraciones descentradas.

Las antenas de lente comparten algunas características de los reflectores, siendo capaces de generar haces directivos al ser iluminadas por una bocina. Su funcionamiento en transmisión hace que no exista bloqueo por parte del alimentador, lo cual es una ventaja adicional respecto a los reflectores. En el caso de las lentes esféricas, como las lentes de Lunenburg, su

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

simetría permite generar haces múltiples con una alta eficiencia de radiación y sin que apenas exista aberración del haz, siendo una solución muy atractiva para generar coberturas multi-haz desde un HAPS. Los principales inconvenientes de las lentes son su peso y su volumen (especialmente en diseños a frecuencias bajas), y su difícil proceso de fabricación (debido a la variación gradual del índice de refracción de la lente), que suele tener como resultado una peor eficiencia de radiación y mayores pérdidas de escaneo del haz.

Las agrupaciones de antenas, o arrays, presentan una flexibilidad mayor que los reflectores y las lentes a la hora de conformar el haz, trabajar con distintas polarizaciones y permitir el apuntamiento electrónico del haz. Además, su superficie plana posibilita una mejor integración en el HAPS que en el caso de los reflectores. A pesar de todo ello, los arrays cuentan con importantes desventajas que desaconsejan su uso en este tipo de aplicaciones, como son: pérdidas de inserción elevadas (como consecuencia de la red de alimentación y distribución), mayor nivel de lóbulos secundarios que los reflectores, y coste de fabricación generalmente alto (debido a la complejidad de las redes de alimentación y conformado del haz).

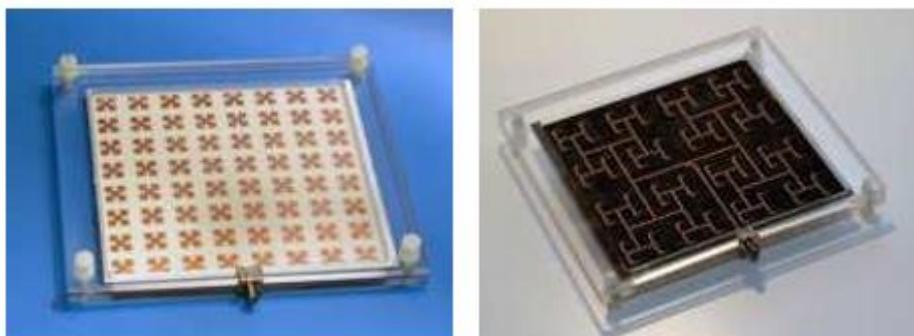


Ilustración 60: Antenas array para HAPS [10].

Por último, las antenas reflectarray combinan algunas ventajas de los reflectores y los arrays que las hacen bastante interesantes para su instalación en HAPS. Un reflectarray es una antena reflectora plana fabricada en tecnología impresa capaz de generar un haz enfocado o conformado cuando es iluminada por una bocina [11]. Los reflectarrays cuentan con una mayor flexibilidad que los reflectores a la hora de generar haces en distintas polarizaciones o a distintas frecuencias. Además, su superficie plana y perfil bajo facilita su integración en un HAPS, al igual que sucede con los arrays. Tradicionalmente, el principal inconveniente de este tipo de antenas ha sido su reducido ancho de banda, en torno a un 10%, aunque en los últimos años se han propuesto numerosas técnicas de diseño que han permitido superar esta dificultad y alcanzar anchos de banda de hasta casi un 30% [12]. En el caso concreto de los HAPS, el ancho de banda no supondría una limitación importante, ya que el enlace de usuario en la banda de 28/31 GHz tiene asignados 300 MHz para cada sentido, lo que representa aproximadamente un 1% de ancho de banda relativo. En el siguiente apartado se presentará una descripción más detallada de este tipo de antenas, así como los resultados de un diseño preliminar de antena multi-haz para HAPS.

9.3. Antenas reflectarray para HAPS

Un reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos impresos sobre un sustrato dieléctrico (parches, dipolos, anillos, etc.), que son iluminados mediante una bocina que actúa como alimentador, como se muestra en la Fig. 2-1 [11]. El diseño de los elementos impresos se realiza de manera que cada elemento introduzca el desplazamiento de fase requerido en el campo incidente para generar un haz enfocado o conformado. La forma más común de conseguir el desplazamiento de fase necesario es ajustando las dimensiones de los elementos impresos. La alimentación por medio de una bocina, al igual que en el caso de los reflectores, evita la complejidad y las pérdidas de las redes de alimentación de los arrays. De esta manera, los reflectarrays pueden alcanzar eficiencias de radiación similares a las de un reflector (>50%) para aperturas grandes, siendo adecuados para sistemas de comunicaciones que requieran de antenas de alta ganancia.

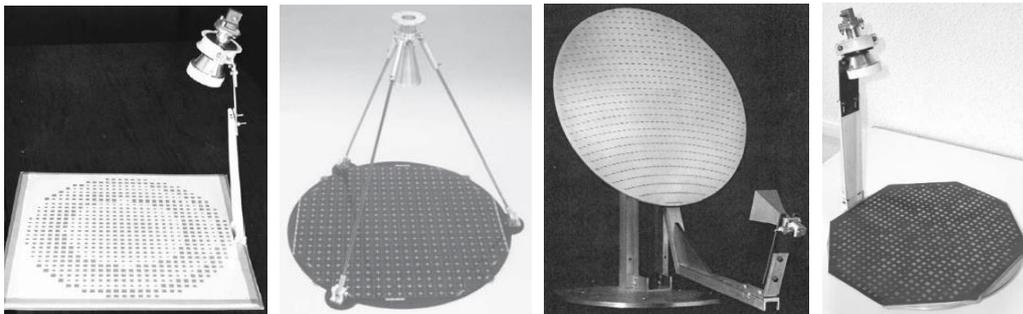
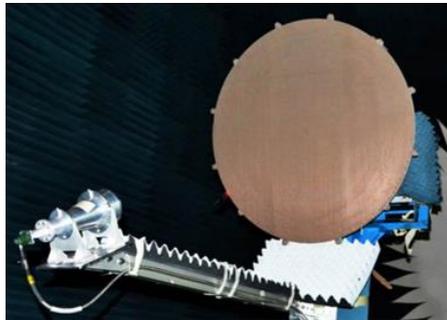


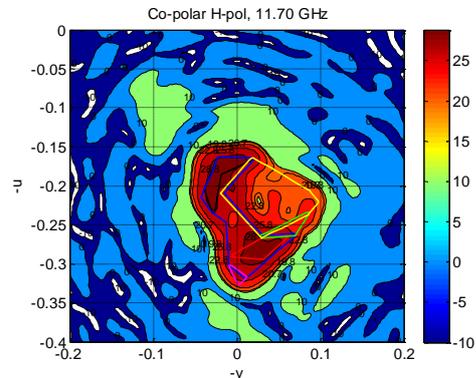
Ilustración 61: Distintos ejemplos de antenas reflectarray [11].

Los reflectarrays son capaces de conformar formas de haz muy precisas por medio de un ajuste adecuado de la fase introducida en cada uno de los elementos impresos. Esto permite que puedan ser utilizados para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica (ver Fig. 2-2). La ventaja es que el proceso de fabricación de un reflectarray de haz conformado sigue siendo el mismo que para un reflectarray de haz pincel (sólo cambian las dimensiones de los elementos impresos), lo que conlleva una importante reducción de costes para este tipo de antenas, normalmente reflectores conformados que requieren de moldes metálicos para su fabricación. Esta característica podría ser de interés en una antena para HAPS que tuviera que proporcionar servicios de radiodifusión sobre un área geográfica irregular.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



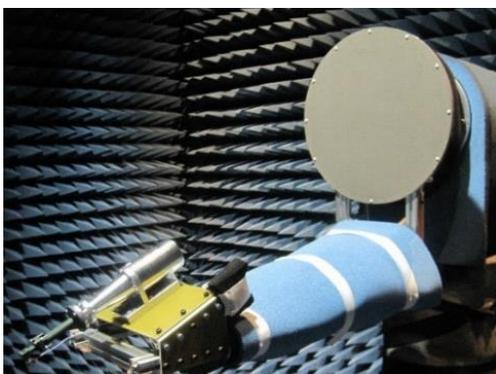
(a)



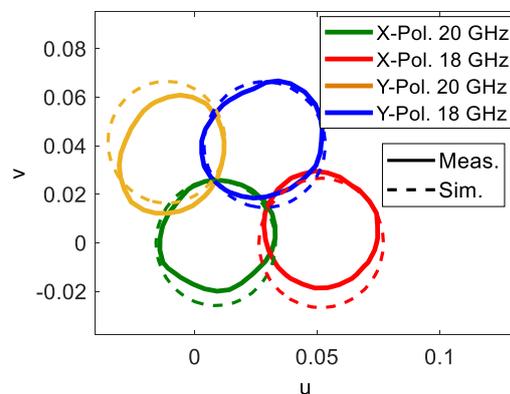
(b)

Ilustración 62: Antena reflectarray de haz conformado para proporcionar cobertura a Sudamérica [13]: (a) prototipo en la cámara anecoica de la UPM, (b) diagrama de radiación medido a 11.7 GHz, frecuencia de transmisión desde el satélite en banda Ku.

Al igual que sucede con los reflectores, los reflectarrays también pueden utilizarse para generar haces múltiples cuando son iluminados por varios alimentadores. En este tipo de aplicaciones, la capacidad de los reflectarrays para controlar el desplazamiento de fase introducido en cada polarización y frecuencia (mediante el uso de elementos reflectarray adecuados) permite que una única antena pueda producir haces independientes en distintas polarizaciones y/o a distintas frecuencias, aun estando iluminada por un único alimentador. Esta capacidad para discriminar en polarización y en frecuencia supone una ventaja con respecto a los reflectores, con los que es necesario utilizar alimentadores situados en posiciones distintas para generar haces en direcciones diferentes en distinta polarización y/o frecuencia. Un ejemplo de ello puede verse en el trabajo presentado en [14] (ver Fig. 2-3), donde una antena reflectarray iluminada por una única bocina es capaz de generar 4 haces adyacentes en distinta frecuencia (18 y 20 GHz) y polarización (X e Y), para proporcionar cobertura celular desde un satélite en banda Ka. Estas características pueden utilizarse para diseñar antenas reflectarray multi-haz para HAPS que generen una cobertura celular sobre la superficie terrestre.



(a)



(b)

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Ilustración 63: Antena reflectarray para generar 4 haces en distinta polarización y frecuencia (4 colores) con un único alimentador [14]: (a) prototipo en la cámara anecoica de la UPM, (b) comparativa entre contornos medidos y simulados a -4dB para los cuatro haces.

La superficie plana de los reflectarrays permite que puedan ser fácilmente integrados en un satélite o vehículo aeroespacial, permitiendo mecanismos eficientes de despliegue en órbita o una vez iniciado el vuelo. Un ejemplo reciente de aplicación de antenas reflectarray desplegables en sistemas reales puede encontrarse en los proyectos ISARA [15] y MarCO [16] desarrollados por la NASA. En ambos proyectos, los reflectarray se utilizan como antena de alta ganancia para comunicaciones con la Tierra desde un nanosatélite o *CubeSat*. En el caso de ISARA (*Integrated Solar Array and Reflectarray*), la antena se encuentra integrada en el mismo panel que las células solares utilizadas para proporcionar energía al *CubeSat*. En ambos proyectos se ha diseñado un reflectarray formado por tres paneles que se pliegan adosados a las paredes del *CubeSat* durante la fase de lanzamiento y se despliegan más tarde cuando el dispositivo está en órbita, como se muestra en la Fig. 2-4. Los nanosatélites del programa MarCO fueron lanzados el pasado mes de Mayo junto con la misión *Insight to Mars* y tienen previsto entrar en operación a finales de Noviembre, cuando se aproximen a Marte.

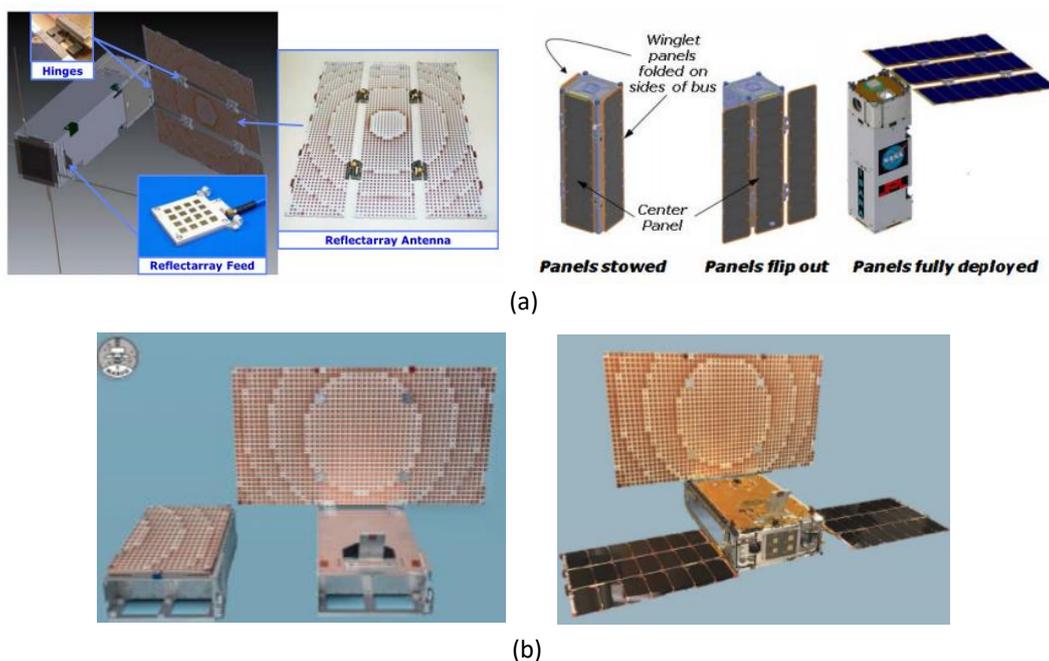


Ilustración 64: Dos ejemplos de antenas reflectarray de paneles desplegables para CubeSats: (a) el proyecto ISARA [17] y (b) el proyecto MarCO [16].

Por último, los reflectarrays posibilitan la integración de conmutadores electrónicos (diodos PIN, varactores, MEMS) en el elemento radiante, lo que permite implementar capacidades de reconfigurabilidad en el diagrama de radiación de la antena (por ejemplo, cambiar la dirección de apuntamiento del haz [18]). Otra posibilidad para diseñar un reflectarray reconfigurable consiste en utilizar cristal líquido como sustrato, un material que cambia su constante dieléctrica al cambiar la tensión de polarización [19]. Un par de ejemplos de aplicación de estas

tecnologías pueden verse en la Fig. 2-5. En el caso de antenas para HAPS, la utilización de reflectarrays reconfigurables podría servir para cambiar la dirección de apuntamiento del haz, en un sistema de comunicaciones de emergencia, o el tipo de cobertura, en el caso de servicios de radiodifusión que requieren de un haz conformado.

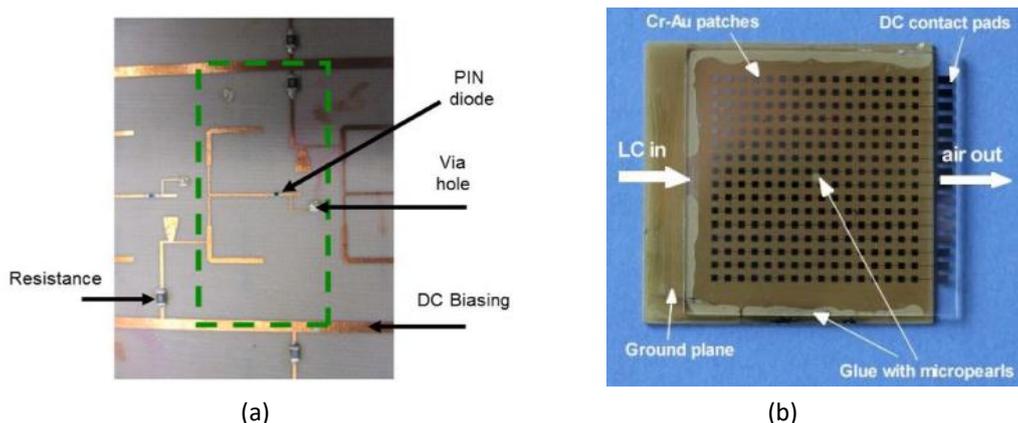
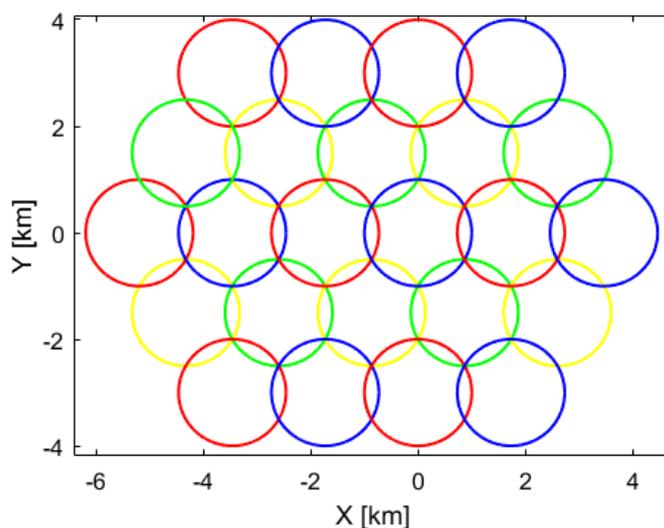


Ilustración 65: Dos ejemplos de reflectarrays reconfigurables que conmutan la dirección de apuntamiento del haz: (a) integrando diodos PIN en el elemento reflectarray [18] y (b) utilizando cristal líquido (liquid crystal, LC) como sustrato [19].

9.3.1. Diseño de una antena reflectarray multi-haz para HAPS

En este apartado se presenta un diseño preliminar de una antena multi-haz para HAPS utilizando la tecnología reflectarray. El objetivo es proporcionar una cobertura celular de cuatro colores con celdas dispuestas de acuerdo a patrón hexagonal (ver Fig. 2-6(a)), donde cada color representa una combinación distinta de frecuencia y polarización. La cobertura debe generarse tanto en la banda de transmisión (27.9-28.2 GHz, Tx) como en la de recepción (31-31.3 GHz, Rx).



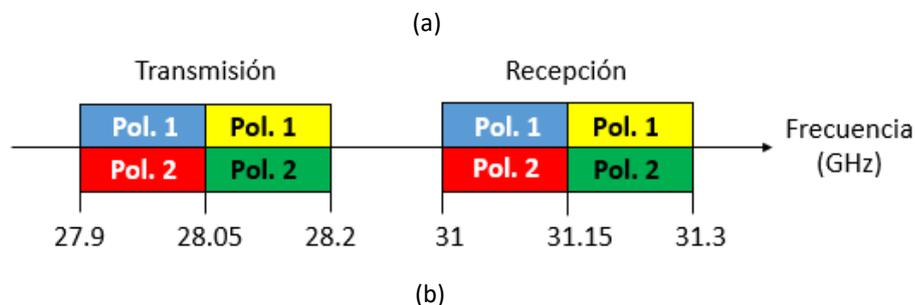


Ilustración 66: Generación de una cobertura celular de cuatro colores: (a) disposición de las celdas sobre la superficie terrestre y (b) esquema de reutilización de frecuencia y polarización.

Cada una de estas bandas se dividirá en dos segmentos de 150 MHz, en los que se generarán haces en dos polarizaciones ortogonales, de acuerdo con el esquema mostrado en la Fig. 2-6(b). La reutilización de frecuencia y polarización en cada celda permite incrementar la capacidad total del sistema [9]. Los principales parámetros de la cobertura y las especificaciones de la antena se resumen en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
Número de celdas (n)	> 10
Radio de las celdas (R)	1 km
Altura del HAPS (H)	22 km
Ganancia de la antena	> 30 dB
Nivel de lóbulos secundarios	< -15 dB
Bandas de frecuencia	28/31 GHz (Tx/Rx)

Ilustración 67: Parámetros de diseño del sistema.

Un reflectarray es una antena de alta ganancia, por lo que dará mejores resultados si se utiliza para generar haces estrechos, que darán lugar a celdas de menor tamaño sobre la superficie terrestre. Por esta razón se ha fijado un tamaño de celda de 2 km de diámetro, que resulta apropiado para entornos urbanos o suburbanos con densidad de población media o alta. En entornos rurales con población dispersa, las celdas podrían tener más de 5 km de diámetro, aunque en ese caso lo más apropiado sería utilizar bocinas u otro tipo de antenas que proporcionen una menor ganancia y haces más anchos.

El nivel de ganancia del haz asociado a los contornos de las celdas en la Figura 2-6(a) debe ser de entre -4 dB y -5 dB con respecto a la ganancia máxima, un valor típico en este tipo de aplicaciones que minimiza la interferencia producida entre haces consecutivos en el mismo color. El ancho de haz que daría lugar a celdas de 1 km de radio en la superficie terrestre puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\theta = 2 \cdot \tan^{-1}(R/H) = 5.2^\circ$$

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La distancia centro a centro entre celdas vecinas en la cobertura hexagonal mostrada en la Fig. 2-6(a) puede obtenerse aplicando principios geométricos de los triángulos equiláteros, de manera que:

$$D = 2R \cdot \cos 30^\circ = 1.73 \text{ km}$$

Por tanto, la separación angular que debe existir entre haces adyacentes generados por la antena del HAPS será:

$$\theta_{b1} - \theta_{b2} = \tan^{-1}(D/H) = 4.5^\circ$$

Una vez obtenidas el resto de especificaciones de la antena a partir de los parámetros de la cobertura celular, pasamos al diseño de la antena reflectarray multi-haz. La Fig. 2-7 muestra una representación de una antena reflectarray plana con su bocina alimentadora, así como los sistemas de referencia que utilizaremos de ahora en adelante. La longitud de onda en el rango de frecuencias de 28/31 GHz es de aproximadamente 10 mm, por tanto, el tamaño de las celdas del reflectarray se fijará en unos 5 mm x 5 mm, para evitar la aparición de lóbulos de difracción y proporcionar un comportamiento más robusto de la respuesta en fase y amplitud del elemento reflectarray frente a variaciones en el ángulo de incidencia desde la bocina [11].

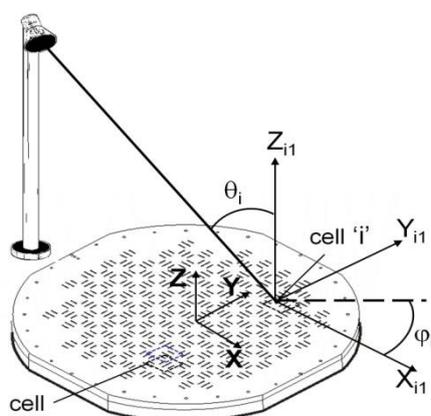


Ilustración 68: Representación de una antena reflectarray con bocina alimentadora, indicando los sistemas de coordenadas de referencia.

Una vez establecido el tamaño de la celda reflectarray, las dimensiones de la antena se estiman a partir de los requisitos de ganancia y ancho de haz. En este caso, si se considera una antena reflectarray cuadrada de 30 x 30 elementos (15 cm de lado), la ganancia máxima obtenida a 28 GHz asumiendo elementos reflectarray ideales es de unos 32.3 dB, con un ancho de haz a -4.5 dB que coincide con los 5.2° requeridos. La eficiencia de radiación está entre un 65% y un 70%, aunque en un diseño con elementos reflectarray reales será algo menor. Los diagramas de radiación simulados de una antena reflectarray diseñada a 28 GHz con elementos ideales para radiar un haz enfocado en cada polarización en las direcciones $\theta_{b1} = 15.5^\circ$ y $\theta_{b1} = 20^\circ$ (haces separados 4.5°) se muestran en la Fig. 2-8. Los lóbulos secundarios se encuentran a un nivel de -19 dB con respecto a la ganancia máxima.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

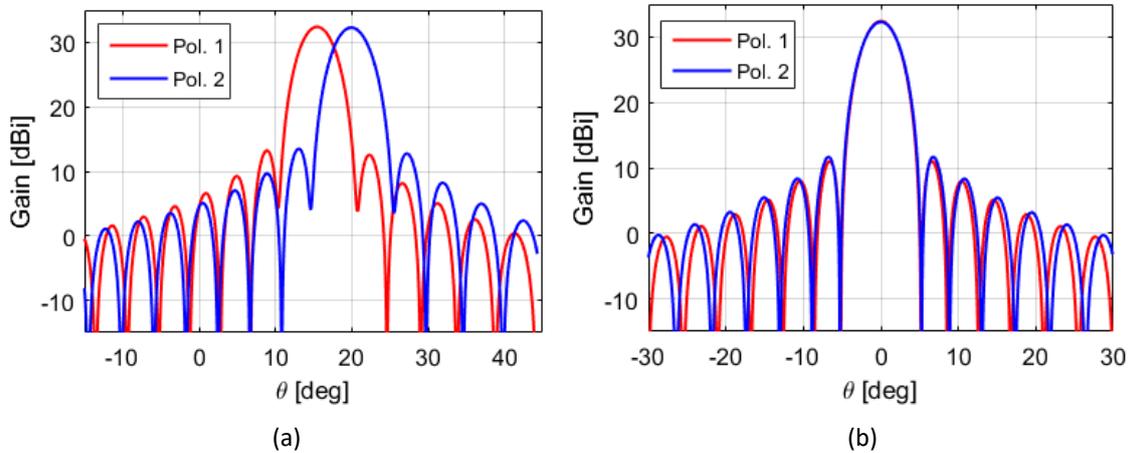


Ilustración 69: Diagramas de radiación simulados a 28 GHz de la antena reflectarray diseñada para radiar dos haces enfocados en polarización ortogonal: (a) en el plano XZ (ortogonal a la superficie del reflectarray y que contiene la bocina), (b) en el plano ortogonal en la dirección del haz.

Como alimentador se ha utilizado una bocina con un diámetro de boca de 28 mm, cuyo diagrama de radiación ha sido simulado mediante una función de tipo $\cos^q(\theta)$ [20]. El valor del parámetro 'q' ha sido estimado mediante el programa de simulación "SABOR", obteniéndose que $q = 12$ a 28 GHz (ancho de haz a -12 dB de 54°) y $q = 14.5$ a 31 GHz (ancho de haz de 49°), como se muestra en la Fig. 2-9.

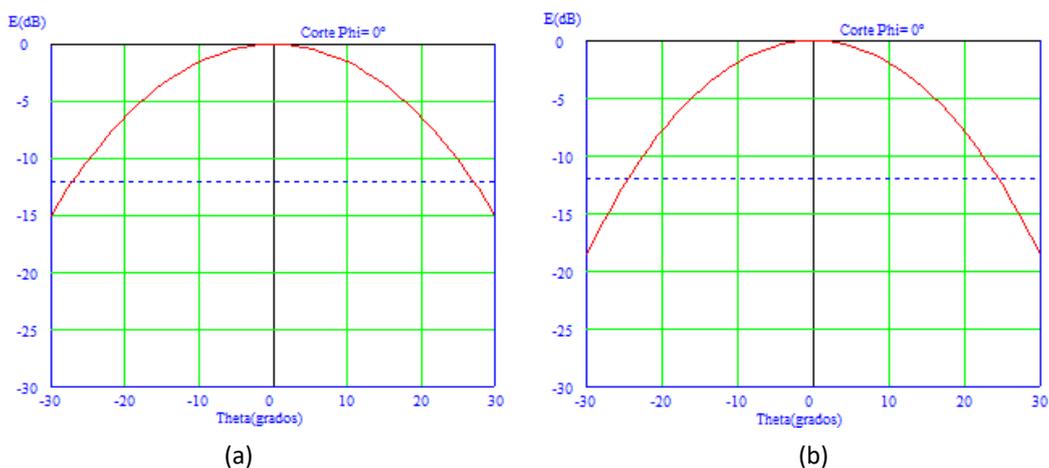


Ilustración 70: Diagramas de radiación simulados mediante "SABOR" para una bocina de 28 mm de diámetro de boca: (a) a 28 GHz y (b) a 31 GHz.

La distribución de amplitud del campo incidente sobre la superficie del reflectarray a 28 y 31 GHz se muestra en la Fig. 2-10. Como puede verse, los niveles de iluminación en el borde del reflectarray se encuentran entre -8 y -12 dB, lo que permite maximizar la ganancia de la antena haciendo que la eficiencia combinada de iluminación y *spillover* sea máxima [20].

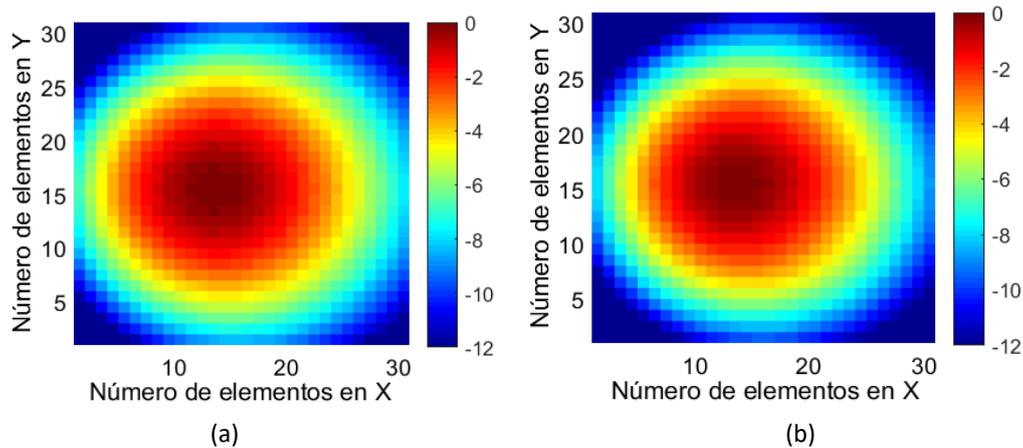


Ilustración 71: Distribución de amplitud (en dB) del campo incidente sobre la superficie del reflectarray: (a) a 28 GHz y (b) a 31 GHz.

Las simulaciones anteriores nos permiten comprobar que el tamaño estimado para la antena cumple con las especificaciones del diseño. Sin embargo, para generar múltiples haces la antena deberá ser iluminada mediante un número mayor de bocinas, y entonces nos enfrentaremos a los siguientes problemas:

- Posible bloqueo producido por las bocinas que iluminan el reflectarray: puede evitarse utilizando una configuración descentrada, como la de la Fig. 2-7, donde los alimentadores estarían situado en la dirección opuesta a la dirección de radiación de los haces.
- Degradación del haz: el diseño del reflectarray se realizará para una posición concreta del alimentador. Al añadir más bocinas para generar más haces, estos presentarán una cierta degradación a medida que se alejan del haz central. Esto se podría solucionar en un diseño más detallado de la antena aplicando técnicas de optimización.
- Diferente ancho de haz en Tx (28 GHz) y Rx (31 GHz): la antena es eléctricamente mayor a 31 GHz que a 28 GHz, por lo que la ganancia de los haces se incrementa ligeramente (unos 0.8 dB mayor). El efecto que tiene el aumento de ganancia es que los 5.2° de ancho de haz se asocian a un nivel de ganancia cercano a los -5.5 dB respecto al máximo, en lugar de -4.5 dB. En un diseño más detallado, puede llevarse a cabo una optimización del diseño a 31 GHz para ensanchar un poco los haces en la banda de Rx.
- Separación demasiado pequeña entre haces adyacentes: no es posible generar los haces con la separación requerida y eficiencia de radiación aceptable. La separación entre haces generados por bocinas contiguas es casi el doble de lo requerido (unos 8° en lugar de 4.5°). Si se aumenta la distancia focal para reducir la separación entre haces, el resultado es un incremento muy considerable de spillover que hace que la eficiencia de radiación de la antena sea muy baja.

Los tres primeros problemas son típicos de las antenas multi-haz y de antenas que operan en dos bandas de frecuencia, y pueden solucionarse mediante las técnicas arriba indicadas. Sin embargo, el cuarto problema reviste una importancia mayor y condicionará el diseño de la antena multi-haz para HAPS.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En la Fig. 2-11 podemos ver una ilustración de este problema: las bocinas contiguas representadas en la Fig. 2-11(a), separadas 30 mm, generan haces con una separación de 9° , como se muestra en la Fig. 2-11(b). Es imposible obtener una separación menor, ya que las bocinas chocarían. La capacidad de los reflectarrays para controlar de manera independiente el retardo de fase introducido en cada polarización puede aprovecharse para corregir este problema en un plano, de manera que cada bocina generaría dos haces en polarización orthogonal separados 4.5° , como se muestra en la Fig. 2-11(c).

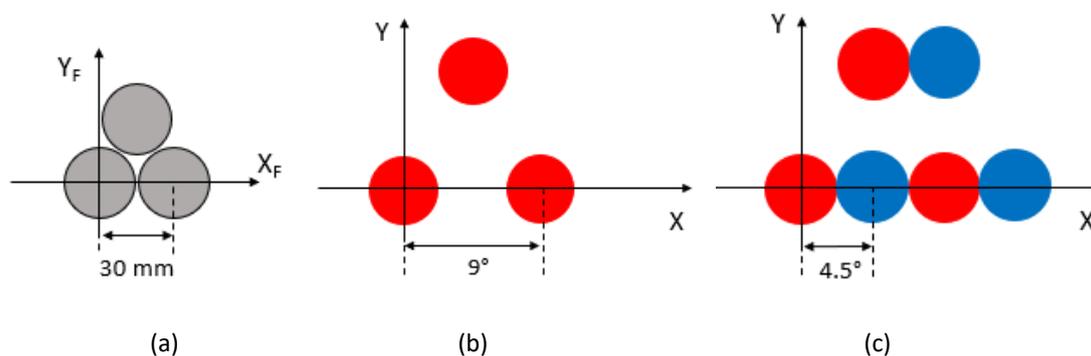


Ilustración 72: Ilustración del problema de la separación entre haces: (a) conjunto de bocinas contiguas, (b) huellas de los haces generados en una polarización, y (c) huellas de los haces generados en las dos polarizaciones (cada bocina genera dos haces).

Este mismo problema aparece en los satélites de comunicaciones en banda Ka, que proporcionan una cobertura celular basada también en un esquema de cuatro colores [9], [14]. En este caso, la solución más extendida consiste en emplear cuatro antenas (normalmente reflectores parabólicos) para producir toda la cobertura, de manera que cada antena se encarga de generar los haces de un mismo color en Tx y Rx. De esta forma se consigue evitar el problema de la separación entre haces, existiendo hueco suficiente para colocar las bocinas en todos los reflectores (nunca hay dos haces vecinos del mismo color).

En el caso de las antenas reflectarray, su capacidad para generar haces independientes en polarización orthogonal con una misma bocina nos permitirá reducir el número de antenas de cuatro a dos: cada antena generará los haces de dos colores en Tx y Rx (dos haces por bocina), de manera que la combinación de las dos antenas dará lugar a la cobertura de cuatro colores. Podemos ver una representación de la solución propuesta para la antena multi-haz del HAPS en la Fig. 2-12, donde se muestra una configuración basada en dos reflectarrays de 15 cm x 15 cm diseñados para operar en las bandas de 28 y 31 GHz con haces independientes en cada polarización. Las direcciones de radiación de los haces se fijarán durante el proceso de diseño para conseguir que el entrelazado de las huellas generadas por los haces sobre la superficie terrestre dé lugar a una cobertura celular de cuatro colores.

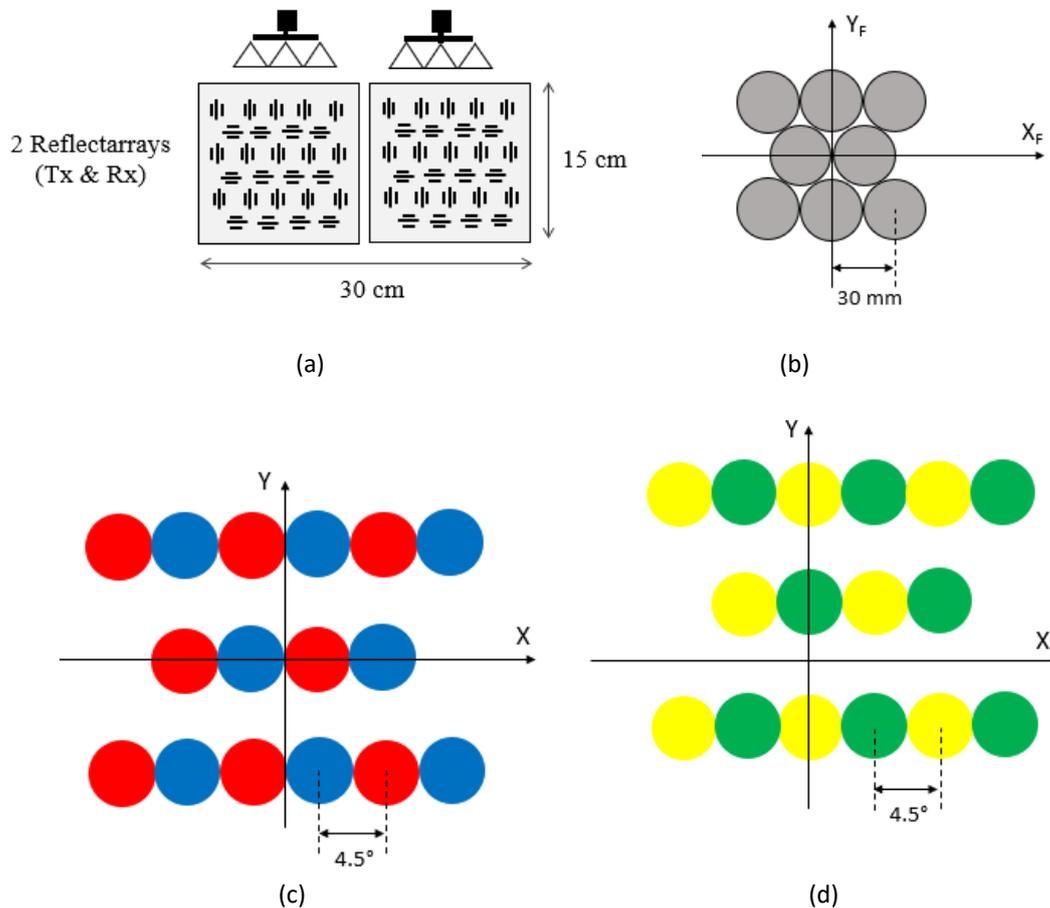


Ilustración 73: Ilustración de la solución propuesta para la antena multi-haz del HAPS: (a) dos antenas reflectarray de 15 cm x 15 cm operando en Tx y RX, (b) bocinas utilizadas para iluminar cada reflectarray, y haces generados por el primer reflectarray (c) y el segundo reflectarray (d), siguiendo el esquema de colores de la Fig. 2-6.

Las distribuciones de retardo de fase que deben ser implementadas en la superficie del reflectarray en cada polarización a 28 y 31 GHz se muestran en la Fig. 2-13. En este trabajo supondremos elementos reflectarray ideales que proporcionarán el retardo de fase necesario en cada polarización y frecuencia, y que no presentarán pérdidas. En un diseño realista, las pérdidas introducidas por los materiales dieléctricos utilizados como sustrato harían que la ganancia disminuyera ligeramente (entre -0.5 y -1 dB). Además, el diseño de los elementos impresos (realizado normalmente ajustando sus dimensiones) podría presentar complicaciones en función del ángulo de incidencia desde el alimentador y del valor de fase requerido, pudiéndose introducir un cierto error de fase en la respuesta del elemento.

La elección del elemento reflectarray en un diseño más detallado se llevaría a cabo de acuerdo con los requisitos de la antena (operación a 28 y 31 GHz en doble polarización). Por ejemplo, en el caso de trabajar con polarizaciones lineales ortogonales (X e Y), el diseño podría realizarse utilizando un elemento basado en agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos,

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

como el mostrado en la Fig. 2-14. Este elemento es sencillo y fácil de fabricar (2 niveles de dipolos impresos mediante fotograbado), y presenta una contra-polar muy baja. Si se quiere operar en doble polarización circular, podría utilizarse un elemento reflectarray más complejo, como el mostrado en [21], o bien aplicar una técnica de rotación variable de los elementos, como en [22].

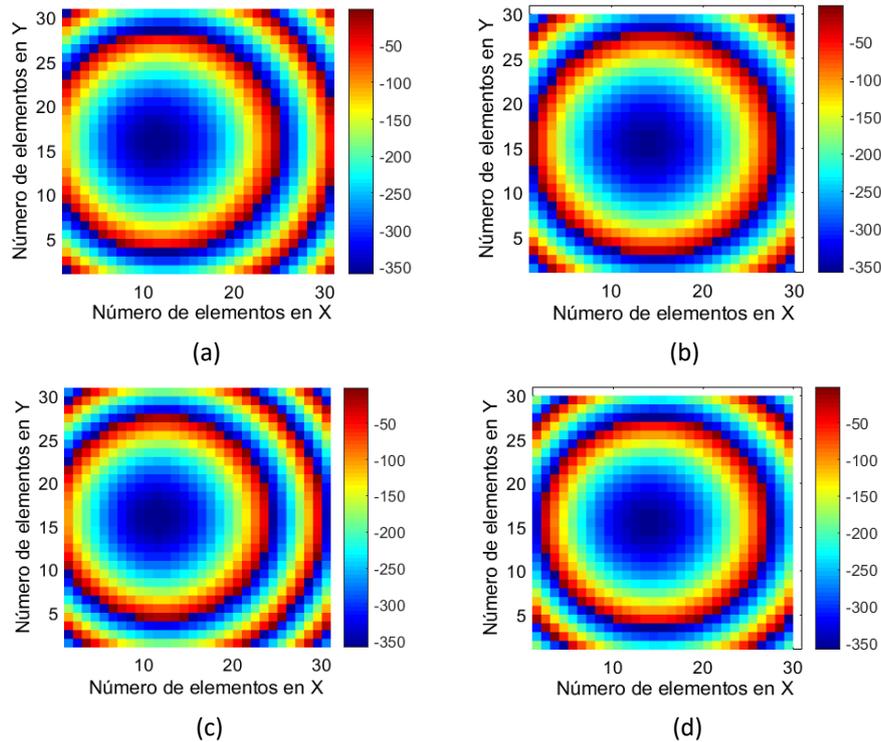


Ilustración 74: Distribuciones de fase (en grados) a implementar en el reflectarray: (a) polarización 1 a 28 GHz, (b) polarización 2 a 28 GHz, (c) polarización 1 a 31 GHz, (d) polarización 2 a 31 GHz.

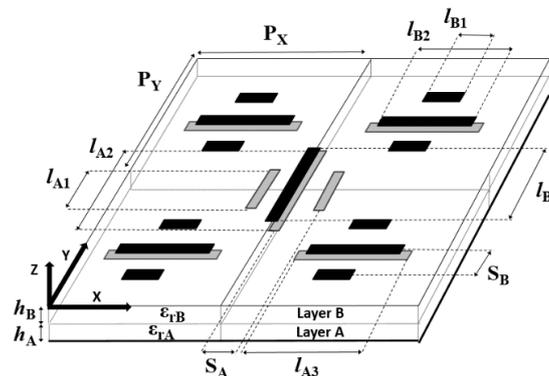


Ilustración 75: Representación de un elemento reflectarray basado en agrupaciones ortogonales de dipolos, para operar en doble polarización lineal.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Los resultados del diseño de la primera antena reflectarray de 15 cm x 15 cm (haces de color rojo y azul) se muestran en las Figs. 2-14 y 2-15. La Fig. 2-15 muestra los contornos de los haces asociados a un nivel de ganancia de 27.75 dBi (unos 4.5 dB por debajo del máximo). Los haces generados por la segunda antena, que permitirían completar la cobertura, se representan en línea discontinua. La separación centro a centro entre bocinas adyacentes es de 31.5 mm, ligeramente mayor que su diámetro (28 mm). Por otro lado, la Fig. 2-16 muestra los diagramas de radiación en el plano 'v=0' (hilera central de haces en la Fig. 2-15) a 28 y 31 GHz. Como se muestra en la figura, los haces presentan una separación de 4.5°, con una ganancia mayor de 31.5 dBi y un nivel de lóbulos secundarios menor de -16.5 dB. El diseño de la segunda antena se llevaría a cabo siguiendo un proceso análogo en el que sólo cambiarían las direcciones de apuntamiento de los haces.

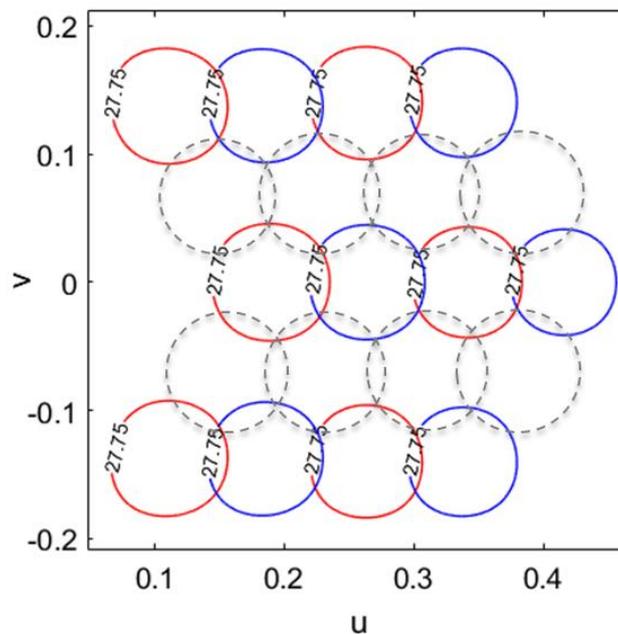
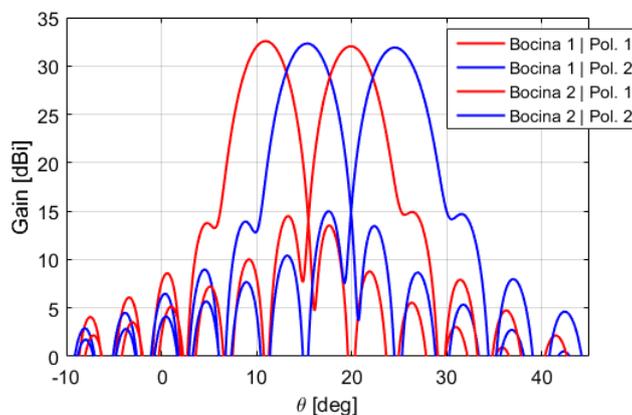
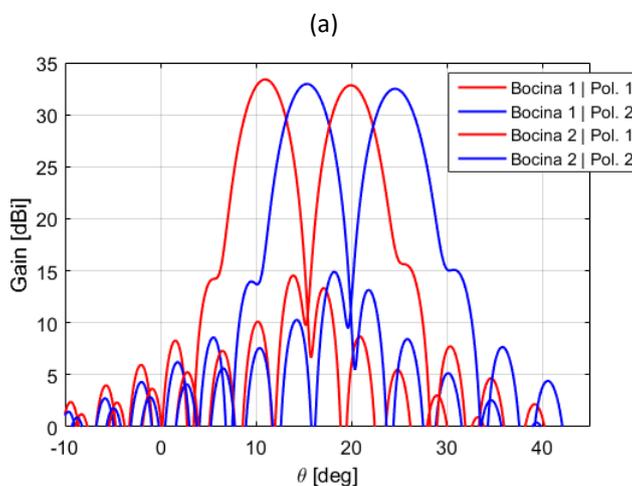


Ilustración 76: Contornos asociados a 27.75 dBi de ganancia (en torno a -4.5 dB respecto al máximo) para los haces generados por la primera antena en las dos polarizaciones (líneas rojas y azules), y para los haces que generaría la segunda antena (líneas grises discontinuas).





(b)

Ilustración 77: Diagramas de radiación de la antena reflectarray en el plano ' $v=0$ ', que contiene los cuatro haces centrales: (a) a 28 GHz y (b) a 31 GHz.

9.4. Conclusiones

La integración de plataformas a gran altura (HAPS) o drones estratosféricos en las redes de comunicaciones actuales permitiría ofrecer un número elevado de servicios a los usuarios: acceso a Internet de banda ancha, radiodifusión, comunicaciones de emergencia, vigilancia, teledetección, etc. Los HAPS complementarían las prestaciones de las redes terrestres y los sistemas de comunicaciones por satélite, proporcionando servicios de carácter temporal (eventos deportivos o culturales, situaciones de emergencia, etc.) o permanente (regiones aisladas sin despliegue de red terrestre). Las antenas para HAPS deben cumplir una serie de requisitos: peso y volumen reducidos, alta eficiencia de radiación, bajo nivel de lóbulos secundarios, generación de haces múltiples, etc.

Las antenas reflectoras planas en tecnología impresa, o antenas reflectarray, podrían ser un candidato interesante para este tipo de aplicaciones. Al igual que los reflectores, proporcionan altos valores de ganancia y eficiencia de radiación. Su capacidad para controlar de manera independiente el retardo de fase introducido en cada polarización y/o frecuencia permite que puedan generar haces múltiples en distinta polarización y/o frecuencia, aun estando iluminados por un único alimentador. Su superficie plana y perfil bajo facilita su integración en el vehículo aéreo, permitiendo incluso mecanismos eficientes de despliegue una vez iniciado el vuelo.

En este trabajo se ha presentado el diseño preliminar de una antena multi-haz para HAPS, empleando dos reflectarrays de tamaño 15 cm x 15 cm capaces de generar una cobertura celular de 4 colores (celdas de 2 km de diámetro) a 28 y 31 GHz, operando en doble polarización. Cada reflectarray genera la mitad de los haces de la cobertura (2 colores),

reduciendo a la mitad el número de antenas que serían necesarias en un sistema convencional (cuatro reflectores, cada uno de ellos generando un color). Además, cada bocina genera dos haces en polarización ortogonal, tanto a 28 como a 31 GHz, con lo que el número de bocinas también se reduce a la mitad respecto a un sistema de reflectores o lentes convencional.

9.5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través del Proyecto TEC2016-75103-C2-1-R, y por el Gobierno de la Comunidad de Madrid, a través del Proyecto SPADERADAR-CM (P2013/ICE-3000).

9.6. Bibliografía

- [1] A. Aragón-Zavala, J. L. Cuevas-Ruiz and J. A. Delgado-Penín, "High-Altitude Platforms for Wireless Communications", *John Wiley & Sons*, Oct. 2008.
- [2] A. Mohammed, A. Mehmood, F. N. Pavlidou, M. Mohorcic, "The role of High-Altitude Platforms (HAPs) in the global wireless connectivity", *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1939-1953, Nov. 2011.
- [3] M. Letizia, "Circularly polarized multi-beam antenna system for High-Altitude-Platforms", PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, May 2013.
- [4] F. Araripe d'Oliveira, F. C. Lourenço de Melo, T. Campos Devezas, "High-Altitude Platforms: Present Situation and Technology Trends", *Journal of Aerosp. Technol. Manag.*, São José dos Campos, vol. 8, no. 3, pp. 249-262, Jul.-Sep., 2016.
- [5] International Telecommunications Union, "Minimum Performance Characteristics and Operational Conditions for HAPS Providing IMT-2000 in the Bands 1885–1980 MHz, 2010–2025 MHz and 2110–2170 MHz in Regions 1 and 3 and 1885–1980 MHz and 2110–2160 MHz in Region 2", ITU Recommendation M.1456, 2000.
- [6] International Telecommunications Union, "Technical and Operational Characteristics for the Fixed Service Using High Altitude Platform Stations in the Bands 27.5–28.35 GHz and 31–31.3 GHz", ITU Recommendation ITU-R F.1569, 2002.
- [7] International Telecommunications Union, "Preferred Characteristics of Systems in the Fixed Service Using High Altitude Platforms Operating in the Bands 47.2–47.5 GHz and 47.9–48.2 GHz", Recommendation ITU-R F.1500, 2000.
- [8] International Telecommunications Union, "Facilitating access to broadband applications delivered by high-altitude platform stations", Resolution 160 (WRC-15), ITU-R, 2015.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [9] M. Schneider, C. Hartwanger and H. Wolf, "Antennas for Multiple Spot Beams Satellites", *CEAS Space Journal*, vol. 2, pp. 59-66, Dec. 2011.
- [10] Q. Xu and J. Thornton, "Report on steerable antenna architectures and critical RF circuits performance," *Deliverable Number D24, FP6-IST-2003-506745 CAPANINA*, pp. 1–85, Nov. 2006
- [11] J. Huang and J. A. Encinar, "Reflectarray Antennas", *IEEE Press/Wiley-Interscience*, Piscataway, NJ/New York, 2008.
- [12] R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, V. Losada and G. Toso, "Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1234-1246, Apr. 2015.
- [13] J. A. Encinar, M. Arrebola, L. F. de la Fuente, G. Toso, "A Transmit–Receive Reflectarray Antenna for Direct Broadcast Satellite Applications", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 59, no. 9, pp. 3255-3264, Sep. 2011.
- [14] D. Martinez-de-Rioja, E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, G. Toso, "Reflectarray to Generate Four Adjacent Beams per Feed for Multi-Spot Satellite Antennas", accepted in *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, Oct. 2018.
- [15] R. E. Hodges, M. J. Radway, A. Toorian, D. J. Hoppe, B. Shah and A. E. Kalman, "ISARA: Integrated Solar Array and Reflectarray CubeSat Deployable Ka-band Antenna", in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI)*, Vancouver, BC, Canada, July 2015, pp. 2141-2142.
- [16] R. E. Hodges, N. Chahat, D. J. Hoppe and J. D. Vacchione, "A deployable high-gain antenna bound for Mars: Developing a new folded-panel reflectarray for the first CubeSat mission to Mars", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 39-49, Apr. 2017.
- [17] R. Hodges, D. Hoppe, M. Radway, and N. Chahat, "Novel deployable reflectarray antennas for CubeSat communications (Invited)," in *Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques Society Int. Microwave Symp.*, Phoenix, AZ, 2015.
- [18] E. Carrasco, M. Barba and J. A. Encinar, "X-band reflectarray antenna with switching-beam using PIN diodes and gathered elements", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5700-5708, Dec. 2012.
- [19] R. Marin, A. Moessinger, F. Goelden, S. Mueller and R. Jakoby, "77 GHz reconfigurable reflectarray with nematic liquid crystal", in *Proc. 2nd Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Edinburgh, United Kingdom, Nov. 2007.
- [20] T. Lo and S. W. Lee, "Antenna Handbook. Vol. I. Antenna Fundamentals and Mathematical Techniques". Van Nostrand Reinhold.1993.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [21] M. Hosseini and S. V. Hum, "A dual-CP reflectarray unit cell for realizing independently controlled beams for space applications", in *Proc. 11th Eur. Conf. Antennas Propag.(EuCAP)*, Paris, France, April 2017, pp. 66-70.
- [22] M. Zhou and S. B. Sørensen, "Multi-spot beam reflectarrays for satellite telecommunication applications in Ka-band," in *Proc. 10th Eur. Conf. Antennas Propag., (EuCAP)*, Davos, Switzerland, Apr. 2016.

10. LA NUEVA GENERACIÓN WI-FI: REDES LIGHT FIDELITY.

Daniel Martínez de Rioja del Nido y Eduardo Martínez de Rioja del Nido.
Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la UPM.

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador

10.1. Resumen

Light Fidelity funciona a frecuencias ópticas, con atto-celdas y presenta algunas ventajas frente a los sistemas de RF. No interfiere ni le afectan las señales de RF. Dado que en iluminación doméstica se emplean bombillas de tipo LED, se puede aprovechar la infraestructura eléctrica de las viviendas y edificios para la puesta en funcionamiento de este nuevo sistema.

10.2. Introducción

Las redes Wifi son hasta ahora, las redes domésticas por excelencia. Son muchos los hogares que hoy en día, utilizan una conexión Wifi para su acceso a Internet.

Dado el gran aumento de la demanda en el área de la transmisión de datos, el espectro radioeléctrico por debajo de los 10 GHz resulta insuficiente. La industria de las comunicaciones móviles ha trasladado el funcionamiento de los equipos a frecuencias por encima de los 10 GHz. Sin embargo, surgen nuevos problemas: las pérdidas aumentan con la frecuencia y los obstáculos suponen una atenuación mayor a medida que nos movemos hacia la zona más alta del espectro radioeléctrico. Como consecuencia, los sistemas buscan la visión directa entre transmisor y receptor utilizando técnicas como la de conformado de haz y cobertura con celdas pequeñas de unos 50 metros de radio como máximo.

Light Fidelity puede entenderse como el resultado de esta tendencia a desplazar el funcionamiento de los sistemas de comunicaciones hacia las zonas del espectro de frecuencias más altas. Concretamente, Light Fidelity es un sistema de comunicaciones basado en ondas nano-métricas. Con un solo micro LED, y acceso OFDM, se han conseguido velocidades de transmisión muy elevadas.

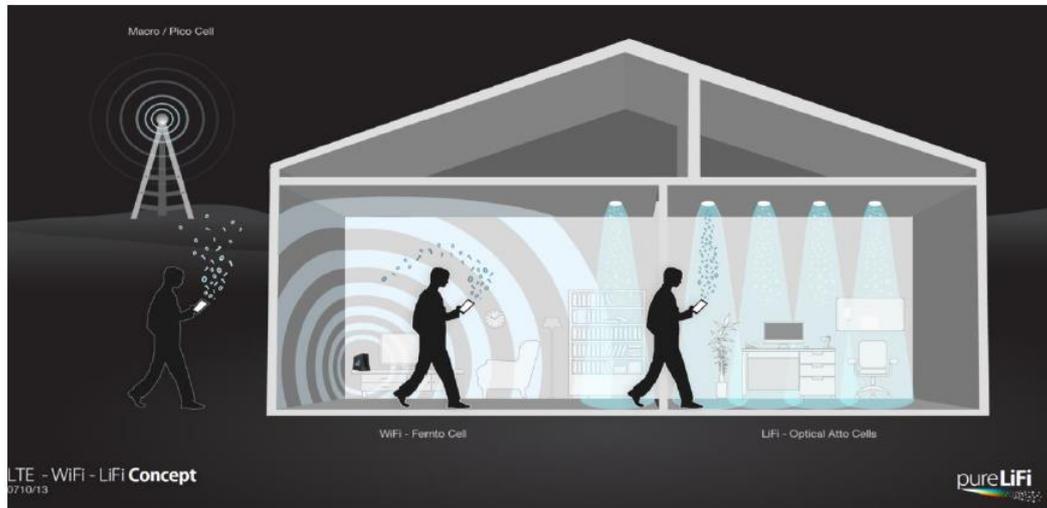


Ilustración 78: Representación esquemática de Light – Fidelity.

10.3. Comunicaciones ópticas no guiadas (OWC)

Las comunicaciones ópticas no guiadas, conocidas por las siglas OWC, tienen dos aspectos de funcionamiento muy diferenciados. Por un lado, las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO), empleando transmisores basados en diodos LED, IR-LED o láser y receptores con fotodiodos. El otro aspecto de las OWC, son las redes de comunicaciones móviles para espacios interiores y que utilizan diodos LED como elementos básicos para la transmisión.

El primer sistema de tipo FSO, se puso en funcionamiento en 1979, estaba centrado sobre los 950 nm en la banda IR y con modulación OOK consiguió una velocidad de transmisión de 1 Mb/s. En 1996 se alcanzaron 50 Mb/s con un sistema similar. En 2003, con diodos LED de luz blanca (VLC), la velocidad aumentó hasta los 400 Mb/s. En 2006, se llegó a los 500 Mb/s con técnicas de modulación de intensidad, detección directa (IM/DD) y OFDM. En un prototipo de polarización directa por corriente (DCO-OFDM), separando las modulaciones de los diodos rojo, azul y verde de un LED blanco y con filtros ópticos en recepción se pudieron alcanzar los 800 Mb/s. Configurando el transmisor y el receptor como MIMO, la velocidad de transmisión puede llegar a los 3,5 Gb/s.

En sus inicios, los enlaces ópticos en el espacio libre fueron diseñados en la zona del espectro correspondiente al IR próximo, esto se tradujo en distancias de propagación muy pequeñas. Sin embargo, la tecnología LED está sustituyendo a las bombillas de filamento incandescente y a los tubos fluorescentes en viviendas y oficinas. También, está previsto que los diodos LED de tipo comercial, puedan operar como una fuente de datos de gran capacidad. Las denominadas comunicaciones con luz visible (VLC), permiten grandes anchos de banda de funcionamiento pero en recepción necesitan un fotodiodo. La incidencia de luz solar durante las horas del día enmascara en el fotodiodo las señales de los LED originando problemas en la recepción de las señales.

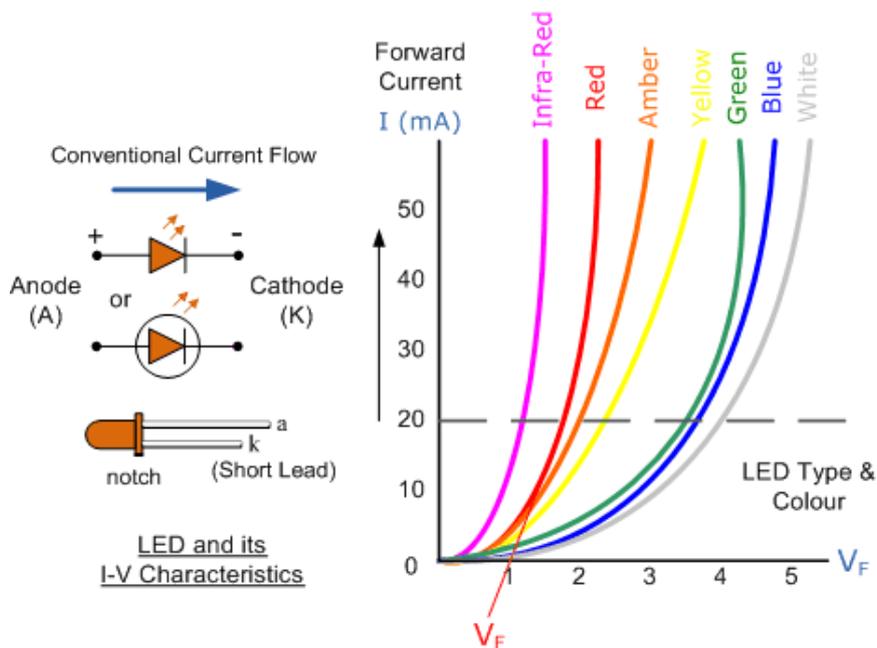
TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Light Fidelity es un sistema inalámbrico que utiliza la zona del espectro visible para la transmisión de datos. Es una tecnología que se dio a conocer en el año 2011, en Edimburgo. Normalmente se emplean diodos LED para generar las señales a transmitir y funciona como una red de comunicaciones con capacidad para dar servicio a varios usuarios. Se trata de una tecnología con conectividad IP, tiene un gran parecido con LTE, y necesita operar en espacios oscuros, sin luz solar. Los fotodiodos necesarios para la recepción de las señales ópticas, requieren que no interfiera la luz solar, ya que provocarían la saturación de los equipos de recepción. Desde un punto de vista medioambiental, hay que destacar dos ventajas de los sistemas li-fi frente a los wi-fi: En primer lugar, no tienen niveles de referencia, lo que indica que son medioambientalmente inocuos. Además, aprovechan la infraestructura de luz de los edificios, lo que los convierte en sostenibles y no sólo medioambientales.

Finalmente, es conveniente indicar que no se ha concretado aún la forma en la que la información va a acceder al foco luminoso, pero se supone que será costosa. Actualmente, existen lámparas LED comerciales que permiten regular la intensidad y la tonalidad de la luz, situándose su precio entre diez y quince veces el de una lámpara convencional.

10.3.1. Diodos led y fotodiodos

El funcionamiento de un diodo LED es similar al de un diodo semiconductor normal pero varía la caída de tensión en polarización directa, dependiendo de la coloración de la luz. Para una corriente de 20 mA, necesaria para el funcionamiento en pequeña señal del diodo, la figura muestra tensiones de 1 hasta 4 voltios.

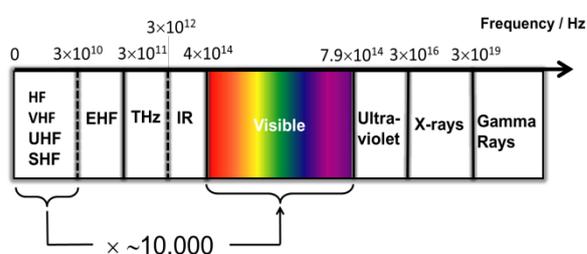


TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Características de los diodos led

Material	Longitud de onda	Color	VF @ 20 mA
GaAs	850-940 nm	INFRA-ROJO	1,2 V
GaAsP	630-660 nm	ROJO	1,8 V
GaAsP	605-620 nm	AMBAR	2 V
GaAsP:N	585-595 nm	AMARILLO	2,2 V
AlGaP	550-570 nm	VERDE	3,5 V
SiC	430-505 nm	AZUL	3,6 V
GaN	450 nm	BLANCO	4 V

Ilustración 79: Curvas Tensión-Corriente de diodos LED.



$3 \cdot 10^{12}$ Hz equivale a 100 μm
 $4 \cdot 10^{14}$ Hz equivale a 750 nm
 $8 \cdot 10^{14}$ Hz equivale a 375 nm

Ilustración 80: El espectro visible.

Los tres colores básicos, rojo verde y azul, tendrían una respuesta espectral en torno a los 450 nm para los azules, 550 nm para los verdes y 650 nm para los rojos.

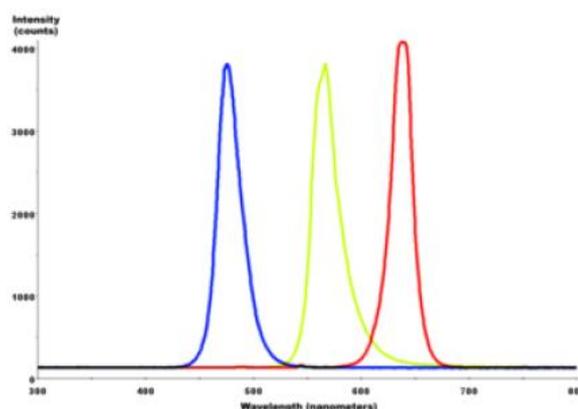


Ilustración 81: Los tres colores básicos de LED.

La mezcla de los tres colores básicos dará lugar a una luz blanca. De hecho, la luz blanca doméstica se obtiene de tres diodos LED integrados. (También, los hay sin integrar).

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

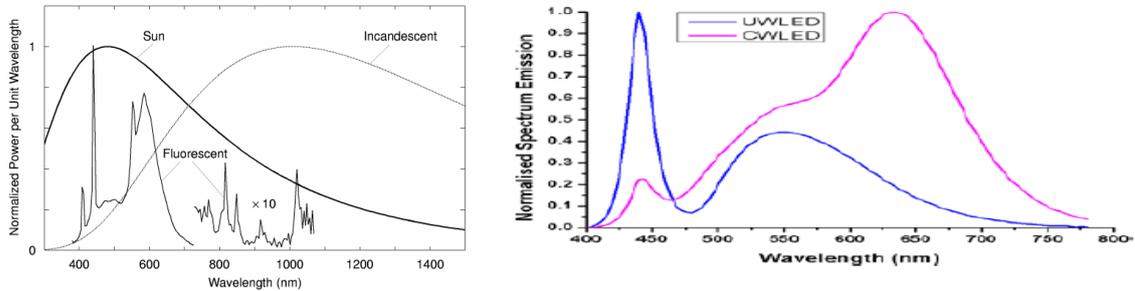


Ilustración 82: Curvas de intensidad de lámparas fluorescentes, de filamento, de la luz solar y de dos LED blancos.

La figura 5 representa la respuesta espectral de dos diodos blancos domésticos, uno con predominio de los azules, que se podría denominar más frío, y otro con predominio de los rojos, más cálido.

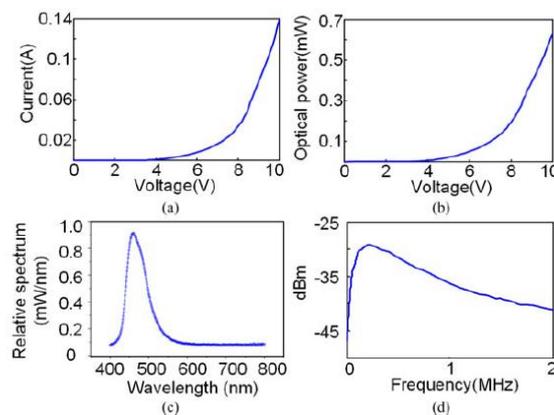


Ilustración 83: Curvas características de diodos OLED.

Los diodos OLED se caracterizan por un precio muy bajo, pero por contra tienen caídas de tensión elevadas, en torno a los 8 voltios y para trabajar en la zona lineal, en pequeña señal, el consumo se sitúa entre 150 y 200 mA. Otra característica a tener en cuenta para su aplicación en redes li-fi es que presentan anchos de banda de potencia mitad de 1 MHz, muy inferiores a los de los LED convencionales que pueden alcanzar un valor típico de 40 ó 50 MHz.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

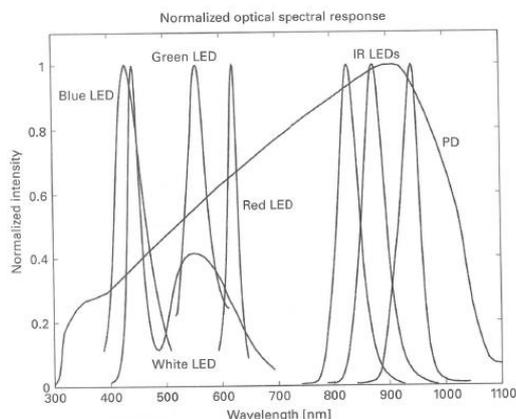


Ilustración 84: Curvas de intensidad de distintos diodos LED, IR-LED y fotodiodos.

La respuesta en frecuencia de un fotodiodo es la que se muestra en la figura anterior. En la figura 7 puede observarse que el mismo tipo de fotodiodo sirve para los diferentes tipos de LED incluidos los diodos IR. Precisamente, en esta banda de frecuencias es donde presenta el máximo. El funcionamiento de estos dispositivos electrónicos es el que se muestra a continuación.

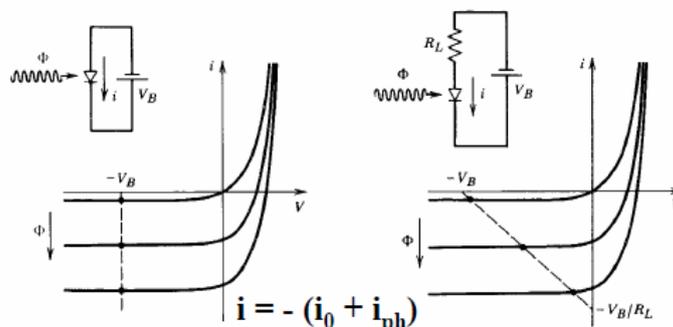


Ilustración 85: Características tensión-corriente de un PD.

Si se añade una tensión que polarice inversamente al fotodiodo puede trazarse una recta de carga sobre la que estarán los diferentes puntos de trabajo posibles.

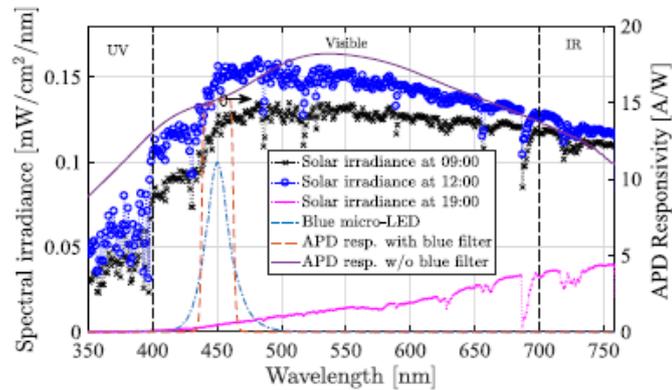


Ilustración 86: Saturación y solapamiento de señal por luz solar de un PD.

Ya se ha comentado el efecto negativo de la luz solar sobre los fotodiodos. En la gráfica anterior, puede observarse como tanto a las 9 de la mañana como al mediodía, la señal del emisor queda enmascarada por la luz solar. Hasta las horas finales de la tarde, sobre las 19 horas, los receptores del sistema, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, no pueden recibir correctamente las señales enviadas por los diodos LED.

10.3.2. Funcionamiento en modo pequeña señal de un diodo led

Consiste en superponer una señal alterna sobre la componente continua de polarización del diodo. Esto origina variaciones de intensidad luminosa imperceptibles para el ojo humano, pero que son detectadas por el fotodiodo. Para conseguir esta forma de operación del diodo LED, es necesario añadir una componente continua adicional a su polarización. Por esta razón se dice que el balance energético de este tipo de sistemas no es equilibrado, aunque desde el punto de vista espectral su rendimiento sea bueno.

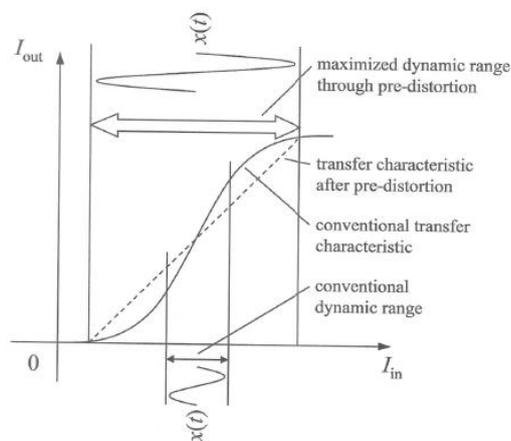


Ilustración 87: Funcionamiento en pequeña señal de un LED.

La señal eléctrica temporal obtenida del fotodiodo, permitirá obtener por muestreo los coeficientes a aplicar a la entrada del dispositivo FFT, recuperando la información enviada.

10.4. Sistemas VLC

Un sistema VLC sencillo como el de la figura 11, funciona como un pequeño faro doméstico. Se trata de un LED con su correspondiente driver, un transistor NPN o un amplificador operacional, cuya luz es captada por un fotodiodo acoplado a un operacional en configuración de transimpedancia. La batería que polariza inversamente el fotodiodo, permite obtener una mayor fotocorriente para una misma intensidad lumínica.

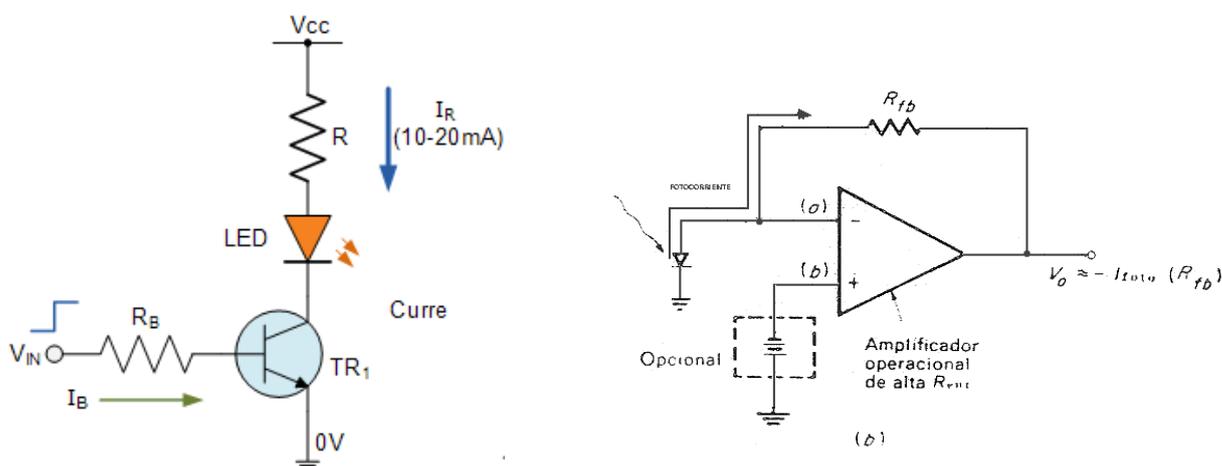


Ilustración 88: Sencillo sistema VLC.

Este tipo de sistema, funcionando en modo OOK, puede alcanzar velocidades de transmisión de 50 Mb/s. La tasa de transmisión está únicamente limitada por el ancho de banda de funcionamiento del diodo LED.

10.5. Las nuevas redes LI-FI

La idea es utilizar la zona del espectro visible y el infrarrojo, una banda de frecuencias de 300 THz aproximadamente, para crear una red con pequeñas celdas a partir de la infraestructura eléctrica de las viviendas y con un enlace ascendente funcionando en la franja del infrarrojo.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

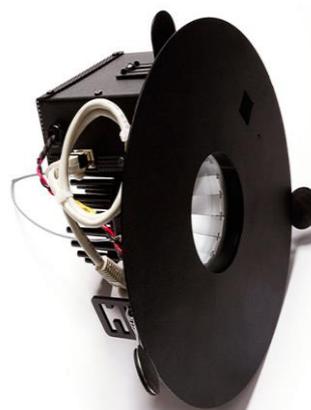
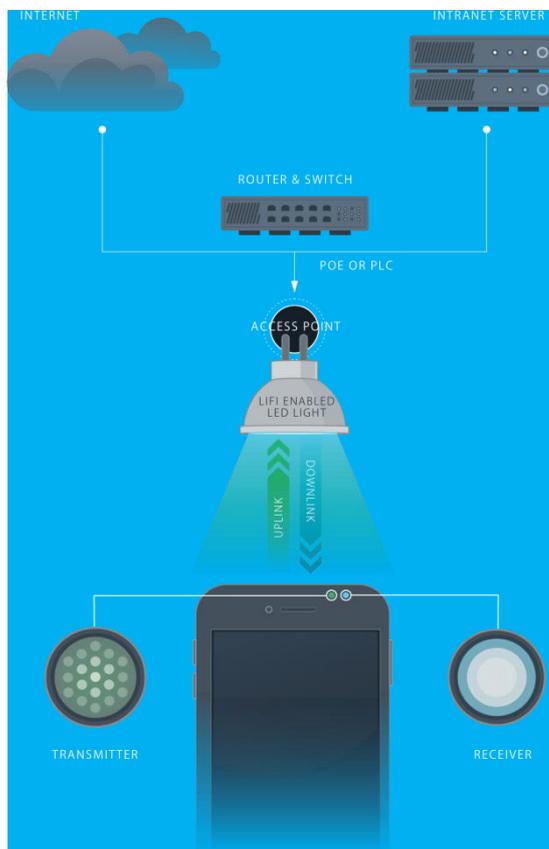


Ilustración 89: Punto de Acceso y Router – Switch de una red Li- Fi.

El esquema es prácticamente el mismo que el de una red wi-fi. Un punto de acceso que en el caso wi-fi, consiste en un equipo con una antena para transmisión y recepción y que en los sistemas li-fi se implementa a través de una bombilla de tecnología LED. En ambos casos el punto de acceso está conectado a un router-switch que sirve para enlazar con otros puntos de acceso o bien, proporcionar a los usuarios una conexión hacia Internet.

En el Salón del Móvil de Barcelona (Mobile World Congress **MWC**) del año 2017 se presentó un prototipo de luminaria incluyendo también, el enrutador-conmutador y que se muestra en la figura 12.

En 2011, el Grupo de Trabajo para Redes de Área Personal inalámbricas del comité IEEE 802 publicó un estándar para VLC: IEEE 802.15.7-2011. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 15.7: Short Range Wireless Optical Communication Using Visible Light.**

También en Julio de este año 2018, el comité IEEE 802 y más concretamente su grupo de trabajo 802.11 que se encarga de las Redes de Área Local inalámbricas, anunció la modificación de sus normas para la inclusión de los sistemas li-fi dentro de las mismas.

10.5.1. El enlace descendente.

Hay diferentes formas de OFDM para sistemas de modulación de intensidad y detección directa IM/DD: Señales ópticas recortadas de forma asimétrica (ACO-OFDM), señales ópticas sobre polarización continua (DCO-OFDM) y p.e. señales resultantes de una combinación de las anteriores (ADO-OFDM).

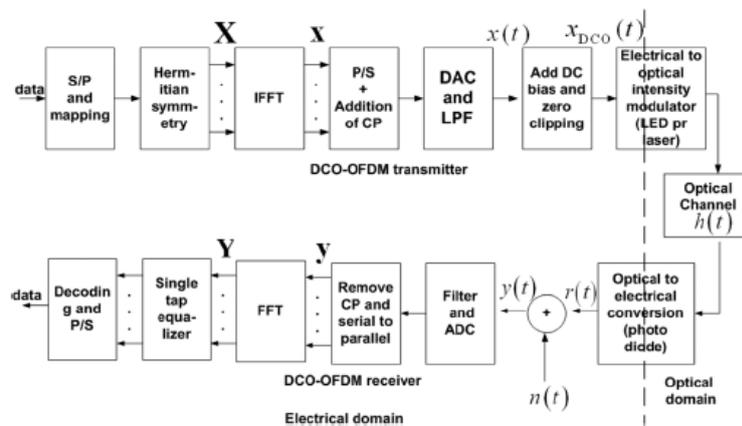


Ilustración 90: Sistema IM/DD DCO-OFDM.

La señal compleja de entrada al IFFT:

$$\mathbf{X} = [X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}]$$

Se fuerza para que tenga simetría hermítica:

$$X_m = X_{N-m}^* \quad \text{for } 0 < m < \frac{N}{2}$$

Así, la señal de salida del bloque IFFT, x será real. La k -ésima muestra de la señal temporal vendrá dada por:

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \exp\left(\frac{j2\pi km}{N}\right)$$

donde N es el número de puntos de la IFFT y X_m es la amplitud de la m -ésima portadora. Debido a la simetría hermítica:

$$X_0 = X_{N/2} = 0$$

y por lo tanto el número de portadoras que transmiten información es: $(N/2) - 1$

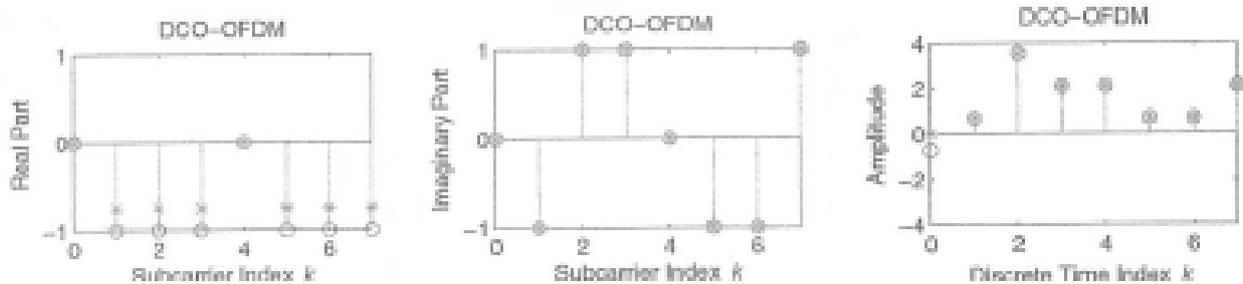


Ilustración 91: Dominio frecuencia y dominio tiempo en un 4-QAM / DCO-OFDM.

En el ejemplo de la figura anterior, se muestra el mapeado de una señal 4QAM, con un número de muestras para la FFT de 8. Como no es posible enviar dos señales desfasadas por la misma banda de frecuencias, se envían dos tramas: una representaría los valores de uno de los ejes, p.e. el real y la otra trama comprende los valores del eje imaginario. Puede observarse que las muestras 0 y 4 ($N/2$) son nulas y que, en la parte real y en la imaginaria, se cumple la simetría hermítica.

La señal de salida del fotodiodo es la que se muestra a continuación. Puede verse en algunos casos el recorte de la señal (clipping) producido por el dispositivo transmisor.

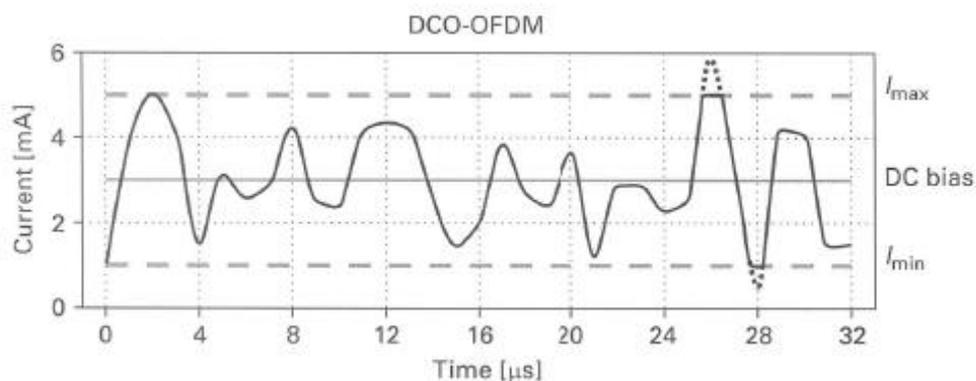


Ilustración 92: Dominio tiempo en recepción con DCO-OFDM.

La señal DCO - OFDM tiene un balance de potencias ineficiente al necesitar una corriente de polarización.

10.5.2. El enlace ascendente

El sistema ACO – OFDM, pone a cero las muestras pares de la entrada a la IFFT y recorta la parte negativa de la salida del diodo LED de transmisión. El diagrama de bloques de un sistema de este tipo es el siguiente:

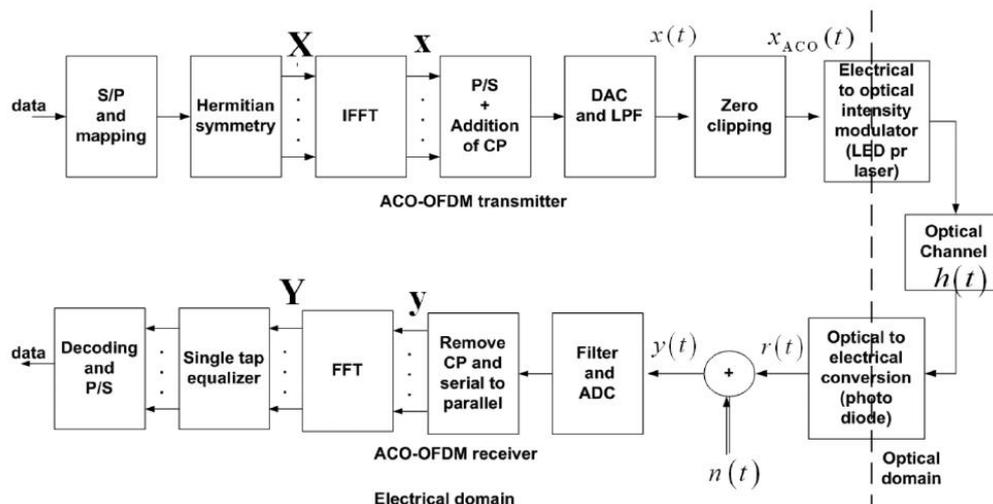


Ilustración 93: Sistema IM/DD ACO-OFDM.

Para un sistema 4-QAM, las muestras a la entrada del bloque IFFT son las representadas en la figura siguiente:

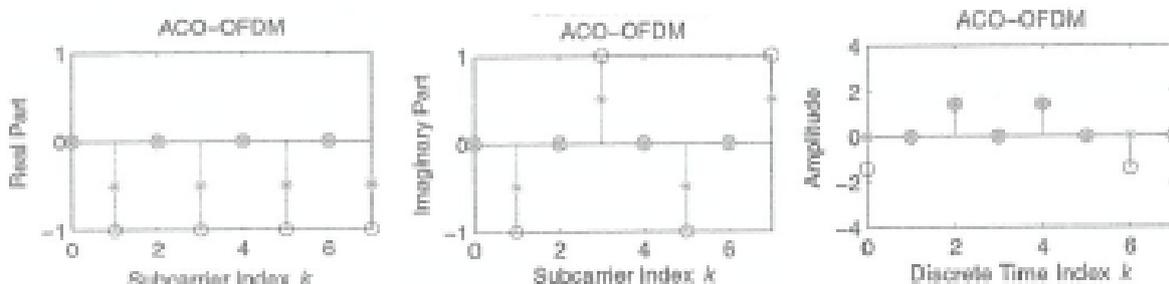


Ilustración 94: Dominio frecuencia y dominio tiempo en un 4-QAM / ACO-OFDM.

Se eliminan las muestras pares, mejorando la relación señal ruido en las muestras impares y luego se recorta la parte negativa de la señal. El balance energético mejora pero el rendimiento espectral disminuye al aportar sólo información $N/4$ de portadoras.

Por otra parte, se demuestra que los valores obtenidos en el dominio temporal presentan la siguiente propiedad de asimetría:

$$x_n = -x_{n+N/2} \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, (N/2) - 1$$

por esta razón, se puede recortar la parte negativa de la señal y recuperar el valor de las muestras temporales posteriormente en el receptor.

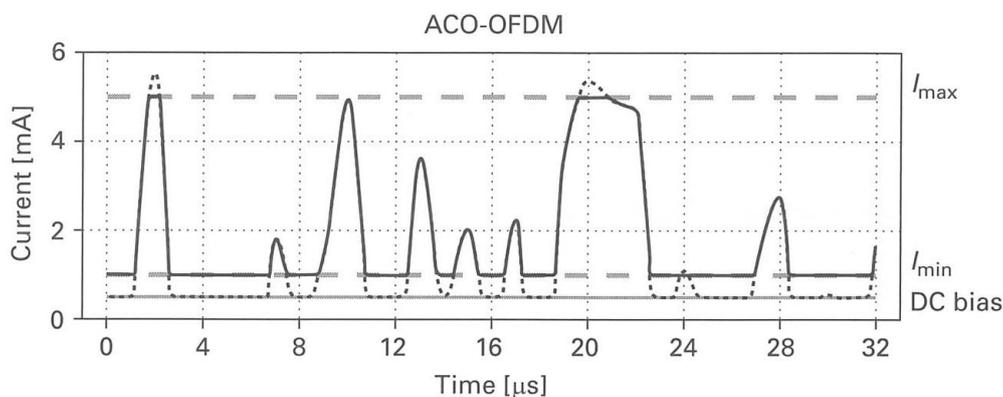


Ilustración 95: Dominio tiempo en recepción con ACO-OFDM.

El recorte de la señal OFDM no solo mejora el balance energético del sistema OFDM sino que además mejora el coeficiente PAPR (peak to average power ratio). El proceso de recorte se caracteriza por el clipping ratio (CR), definido como la relación entre el nivel de recorte y el valor cuadrático medio de la señal OFDM. No obstante, se trata de una operación no lineal que puede originar niveles de distorsión significativos y pérdidas de puesta en servicio. En particular, los recortes a la frecuencia de muestreo de Nyquist dan lugar a ruido en la banda de transmisión, produciendo picos de señal después de la conversión digital analógica. Algunos estudios muestran que efectuando el muestreo a frecuencias por encima de la de Nyquist, se reduce este recrecimiento de picos de señal posterior a la conversión D/A y se produce menos distorsión dentro de la banda de transmisión. Sin embargo, se genera ruido fuera de banda que es necesario filtrar.

10.6. Redes híbridas WI-FI y LI-FI

Se estima que un 80 % del tráfico de datos se genera en el interior de los edificios: viviendas, oficinas, locales de empresas, etc. El despliegue de un gran número de puntos de acceso wi-fi puede constituir un auténtico cuello de botella para la mejora de la capacidad del sistema. La instalación de redes híbridas puede ser una solución a este problema. Con objeto de mejorar la cobertura en espacios interiores, se han probado redes híbridas combinando la velocidad potencial de li-fi y la cobertura relativamente grande de wi-fi.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

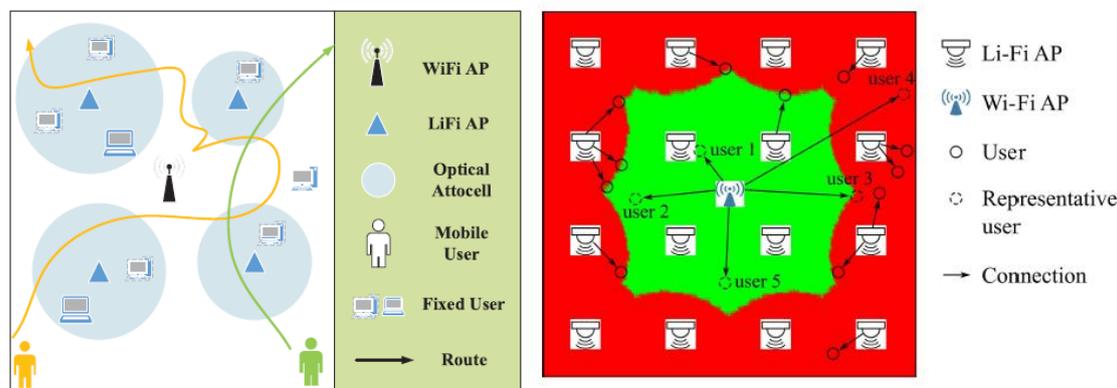


Ilustración 96: Redes híbridas Wi-fi y Li-fi.

Se han llevado a cabo algunos estudios que asignan el punto de acceso wi-fi a los usuarios que están en movimiento, mientras que aquellos usuarios de carácter estático o quasi-estático, son asociados con los puntos de acceso li-fi. En la figura 19 puede verse un usuario, representado en verde, que entra y sale rápidamente del recinto con cobertura de los dos sistemas. El usuario señalado con el color amarillo, deambula por el recinto de forma lenta y pausada. Así pues, el usuario verde sería asignado a la cobertura wi-fi, mientras que el usuario amarillo se conectaría a través de las celdas li-fi.

Otro criterio que se puede aplicar en estos casos es el nivel de la relación señal ruido. En la figura anterior, el área marcada en verde es donde la relación señal ruido de la red wi-fi es mejor que la de la red li-fi. Supone aproximadamente, un 32 % del área total. Esto implica que, si la selección se efectuase exclusivamente teniendo en cuenta el nivel de relación señal ruido, cada punto de acceso li-fi cursaría menos de un 6% del tráfico total. Así pues es necesario determinar con nuevos criterios qué usuarios han de ser conectados a cada una de las redes. Así, los usuarios 1 y 2 están dentro de la zona de mayor nivel señal - ruido de wi-fi. Sin embargo, el usuario 2 emplearía más recursos li-fi que el 1. De esta forma el usuario 1 pasaría a li-fi y el 2 se mantendría en wi-fi. El usuario 3, está en el límite exterior de la frontera por nivel de señal - ruido, por tanto debe ser asociado a un punto de acceso li-fi. El mismo comentario es apropiado para el usuario 4. En ocasiones, el usuario se encuentra cerca de puntos de acceso li-fi que no están en servicio. No obstante, puede ser aconsejable que la demanda de tráfico de este usuario sea atendida por la red li-fi con el objeto de no sobrecargar la red wi-fi.

Toda esta selección habría que realizarla a través de una unidad de control, pero la conclusión en todos los casos, es que la capacidad de la red híbrida es mayor que la de cada uno de sus integrantes por separado.

10.7. Conclusiones

Las nuevas redes Li-fi son redes de transmisión de datos, que funcionan con una arquitectura similar a la de las redes wi-fi, pero a frecuencias ópticas.

VENTAJAS:

- Las redes Li-fi presentan ventajas notables en su instalación, ya que aprovechan la infraestructura eléctrica luminosa de los edificios. Al utilizar la luz de las bombillas con tecnología LED, permite un ahorro al emplear un mismo producto para dos cosas diferentes.
- Al funcionar a frecuencias ópticas, se eliminan los niveles de referencia y son totalmente inocuas.
- Su funcionamiento es compatible al 100% con las redes wi-fi por lo que suponen un aumento de la capacidad de transmisión de datos de las redes actuales.
- Puede usarse en aviones, y en entornos similares, debido a que no interfiere con señales de RF.

INCONVENIENTES:

- Deben funcionar en ausencia de luz solar que puede saturar los fotodiodos del punto de acceso, produciendo fallos en la recepción de las señales tanto del enlace ascendente como del descendente.
- Todavía no se ha normalizado la forma en que la información va a acceder a las bombillas de tecnología LED de los edificios, pero se intuye una operación costosa. De hecho, las lámparas LED que se pueden ajustar en tonalidad e intensidad, son unas 15 veces más caras que las convencionales.
- El factor de cresta es elevado por lo que la capacidad del canal es limitada.
- Sólo vale para la habitación donde se instala.
- Tiene un alcance de algunos metros desde el punto de acceso.
- Al ser tan reciente, surgen los problemas de compatibilidad y uso, ya que ningún dispositivo actual cuenta con un receptor li-fi integrado.

10.8. Bibliografía

- [1] [Sufyan Islim, M y otros. *The Impact of Solar Irradiance on VLC*. Journal of Lightwave Technology. Vol 36, No 12. 2018. Págs. 2376 - 2386.
- [2] Wu, X. y otros. *Access Point Selection for Hibrid Li-fi and Wi-fi Networks*. IEEE Transactions on Communications. Vol 65, No 12. 2017. Págs. 5375 – 5385.

TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [3] Wang, Z., Wang, W., Huang, W. y Xu, Z. **Visible Light Communications**. IEEE Press. 2017.
- [4] Nordrum, A. **Mobile World Congress 2017: PureLiFi Debuts New Li-Fi Luminaire and Shares Progress on Commercial Pilots**. IEEE Spectrum. Marzo 2017.
- [5] Deng y Kavehrad. **Effect of white LED DC-bias on modulation speed for visible light communications**. Pennsylvania State University. Published 2016 in ArXiv.
- [6] Dimitrov, S. y Haas, H. **Principles of Led Light Communications**. Cambridge University Press. 2015.
- [7] Wang y Haas. **Dynamic Load Balancing With Handover in Hibrid Li-fi and Wi-fi Networks**. Journal of Lightwave Technology. Vol 33, No 22. 2015. Págs. 4671- 4682.
- [8] Dissanayake, y Armstrong. **Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems**. Journal of LightwaveTechnology, vol 31, nº 7, april 1, 2013. Págs 1063 – 1072.
- [9] Weir, Bernie. **The Subtle Circuitry Behind LED Lighting**. Spectrum of the IEEE. Feb. 2012.
- [10] Yang, S.C. **OFDMA System Análisis and Design**. Artech House. 2010.
- [11] Agustí Comes, R. y otros. **LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles**. Fundación Vodafone. 2010.
- [12] Mariño Acebal y otros. **Tratamiento digital de la señal. Una introducción experimental**. Ediciones UPC. 1995.
- [13] Carlson, A.B. **Communication Systems**. Mc Graw Hill. 3ª edición. 1986.
- [14] https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html

CONAMA

Monte Esquinza 28 - 3º derecha
28010 Madrid (España)

T +34 91 310 73 50

conama@conama.org

www.conama.org