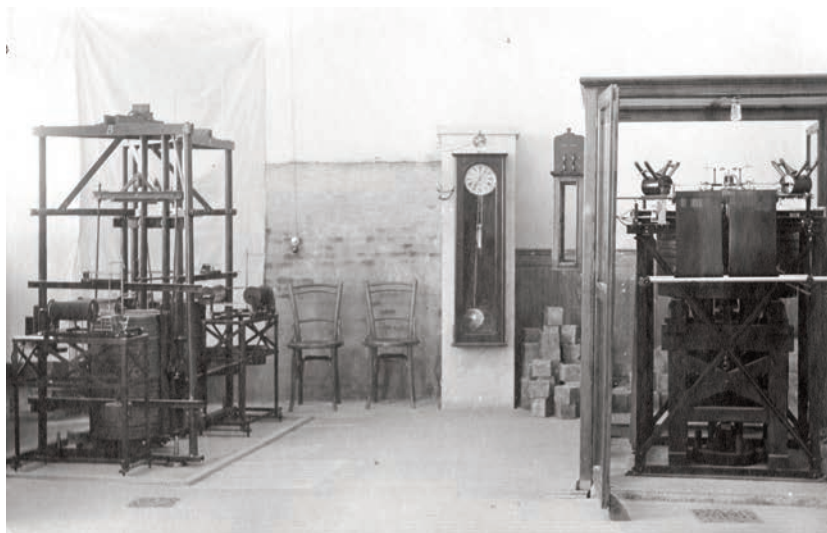


► Mapa Magnético de España de 1924

Los observatorios de geomagnetismo del IGN monitorizan y estudian la variabilidad del campo magnético

SIN PERDER EL NORTE

El 1 de septiembre de 1859. Una magnífica y brillante aurora boreal se deja ver en el cielo de Madrid, presentándose como una inmensa gasa de fuego que ocupa el horizonte. Las líneas telegráficas de gran parte de Europa y América se han colapsado con una actividad espontánea y anormal de los aparatos.



► Instrumentación sísmica y geomagnética en el antiguo Observatorio de Toledo.



Estaba teniendo lugar el “Evento Carrington”, la tormenta geomagnética más intensa de la que se tienen registros, debida a una enorme erupción solar que perturbó a la magnetosfera y al campo magnético terrestre.

El origen del geomagnetismo en el IGN

Desde la creación del IGN hace 150 años, se era consciente de la necesidad de estudiar el geomagnetismo, ciencia en auge debido a la aparición de los primeros instrumentos de registro del campo geomagnético terrestre. Así, a principios del siglo XX, nace el Servicio de Geomagnetismo como una sección encargada de obtener un primer Mapa Magnético de España. Tras más de siete años de trabajo de campo y unos cuantos más de procesamiento, el mapa vería la luz finalmente en 1924, constando de tres hojas: una de declinaciones, otra de inclinaciones y otra de intensidades horizontales. Como base para reducir el levantamiento magnético realizado, se utilizó el Observatorio del Ebro, perteneciente a la Compañía de Jesús, que, si bien tenía una posición muy excéntrica en la Península Ibérica, era un observatorio de primer orden en el ámbito del estudio del geomagnetismo.

Esto, sin embargo, puso de manifiesto la necesidad de que el IGN contase con sus propios observatorios geomagnéticos, en especial con un Observatorio Central situado en el centro de la Península, que sería finalmente establecido en el año 1934 en el nuevo Observatorio Geofísico de Toledo. Dicho observatorio, que nacía como una nueva y mejorada

ubicación de la Estación Sismológica de Toledo (desde 1909 ubicada en los sótanos del edificio de la Diputación Provincial de Toledo), se localizó en la finca Buenavista, a las afueras de la ciudad, y además de la estación Sismológica, se construyó un Observatorio Geomagnético para la monitorización del campo magnético terrestre, y posteriormente una Sección de Geoelectricidad para el estudio de corrientes atmosféricas y telúricas.

Posteriormente, el IGN estableció nuevos observatorios geomagnéticos en Almería, Logroño, Moca (isla de Fernando Poo) y en Tenerife. Todos estos observatorios estuvieron equipados con la instrumentación geomagnética más moderna de su época, incluyendo instrumentación para la determinación de los valores absolutos del campo magnético y para el registro continuo de las variaciones de las componentes del campo.

La creación de los observatorios geomagnéticos por parte del IGN supuso un gran avance en el estudio de esta ciencia dentro de este organismo. Su disposición a lo largo y ancho del territorio español permitió utilizarlos como referencia para la reducción de observaciones de cara a la confección de la cartografía geomagnética que el IGN tenía encomendada. Además, su monitorización continua del campo geomagnético hizo posible la realización de estudios sobre el campo geomagnético interno de la Tierra, así como la detección de fenómenos geomagnéticos externos debidos a la acción solar, como es el caso de las tormentas geomagnéticas.

Durante estos años, el IGN volvió a actualizar el Mapa Magnético de España con nuevas ediciones para las épocas 1939.5 y 1944.5. En 1953 comenzó



► Observatorio geomagnético de Güímar.

un nuevo proyecto para la elaboración conjunta de un mapa magnético de la Península Ibérica junto al Servicio Meteorológico Nacional de Portugal. Los trabajos de campo tuvieron lugar entre 1953 y 1959, observándose un total de 40 estaciones de primer orden (estaciones seculares o de repetición) y 2.416 estaciones de segundo orden (estaciones de mapa). Los valores obtenidos se redujeron a la época 1960.0., obteniéndose así un mapa que constó de tres hojas: una de declinaciones, otra de intensidades horizontales y una tercera de intensidades verticales. Más tarde, a partir de ellas, se confeccionarían las de intensidades totales e inclinaciones. La hoja de declinaciones sería trasladada posteriormente a la época 1970.0 mediante la corrección de la variación secular.

A principios de los años 70 el Servicio de Geomagnetismo aborda una nueva campaña de trabajo de campo, consistente en la observación de 620 estaciones de mapa a lo largo de toda la España Peninsular e islas Baleares, que conforman una malla de puntos de mapa que serán la nueva base para la cartografía. Dicha malla de puntos complementa a una Red de Estaciones de Repetición que se examina cada año para poder trasladar las observaciones de campo a la fecha de la cartografía.

Para 1975.0 se publicaron los mapas de todas las componentes magnéticas, y desde entonces se ac-

tualiza cada 5 años el mapa de Declinación Magnética, y cada 10 años los mapas correspondientes a todas las componentes.

La evolución del geomagnetismo

Con el paso del tiempo, los observatorios geofísicos se habían visto perturbados por factores externos que afectaron a la calidad de sus registros, por lo que fueron dejando de estar operativos. Esto hizo que en los años 80 el IGN se replantease la necesidad de buscar nuevos emplazamientos para sus observatorios geofísicos, con una menor densificación, pero con unas condiciones más estables a lo largo del tiempo, y capaces de ofrecer unas mejores prestaciones acordes a la nueva realidad. En la nueva planificación se decide contar con un observatorio en la península y otro en las islas Canarias, situados en emplazamientos alejados de grandes ciudades y de zonas afectadas por grandes vías de comunicación.

El Observatorio Geofísico de Toledo, reconocido a nivel mundial en el estudio de la geofísica, estuvo instrumentalmente operativo hasta los años 80, en que la calidad de sus datos se vio comprometida, debido a fenómenos de ruido cultural relacionados con el crecimiento de la ciudad, que había llegado a rodear la parcela del observatorio, y los efectos de la electrificación del ferrocarril, que tenían es-



► Observatorio geomagnético de San Pablo de los Montes.

pecial repercusión sobre los instrumentos de geomagnetismo. Para darle continuidad, el IGN adquirió una nueva parcela en la localidad de San Pablo de los Montes, en una zona con muy baja densidad de población, con buena comunicación por carretera y para la que no existe un planeamiento de futuras grandes vías de comunicación o ferrocarriles electrificados, naciendo así el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes. Dicho observatorio constó inicialmente de varios pabellones destinados a la medida del geomagnetismo, entre los que destacan el pabellón de medidas absolutas y el pabellón de variómetros, este último con un diseño particular en forma de bóveda rellena de arena para conseguir un óptimo aislamiento. Igualmente consta de una cueva artificial para el estudio de la sismología, en la que se instalan los sensores sísmicos. Tras unos años de solape y contrastación con el Observatorio Geofísico de Toledo, el observatorio de San Pablo, pasa a estar plenamente operativo y a ser el observatorio de referencia del IGN en geomagnetismo desde el año 1982 y, como estación de la Red Sismográfica Mundial, en 1992. Desde su puesta en marcha, el Observatorio es renovado en su instrumentación con la última tecnología disponible, para ofrecer en todo momento datos de calidad en sus observaciones.

Por otro lado, el Observatorio Geofísico de Tenerife también se había visto afectado en la calidad de sus datos debido al crecimiento de la ciudad de Tenerife hacia su emplazamiento en Las Mesas, así como por la instalación de grandes infraestructuras de telecomunicaciones en sus inmediaciones. Para garantizar un buen emplazamiento de la instrumentación geofísica en las islas Canarias, necesario tanto para el estudio del geomagnetismo como de

la actividad volcánica en las islas, el IGN adquiere una nueva parcela en la localidad de Güímar, en los límites del Parque Nacional del Teide, suficientemente alejada de grandes infraestructuras que puedan perturbar a la instrumentación geofísica. Nace así el Observatorio Geofísico de Güímar, operativo desde principios de los años 90. Este observatorio consta fundamentalmente de un pabellón para la observación de medidas absolutas del campo geomagnético y otro para la monitorización continua de las variaciones del campo geomagnético, y se complementa con una estación sísmica para la detección de movimientos sísmicos relacionados fundamentalmente con la actividad volcánica.

De este modo, son dos los observatorios geomagnéticos que el IGN tiene operativos en la actualidad: el Observatorio Geofísico de San Pablo de los Montes (Toledo) y el Observatorio Geomagnético de Güímar (Tenerife). Ambos están equipados con instrumentación digital moderna para la monitorización del campo magnético terrestre y desde el año 1997 están integrados en la Red Mundial de Observatorios Geomagnéticos (INTERMAGNET), cumpliendo con los requisitos definidos en cuanto a la calidad de la instrumentación, calidad de los datos, operatividad del observatorio y remisión de datos.

El IGN tiene dos observatorios geomagnéticos, en Toledo y Tenerife, integrados en la Red Mundial de Observatorios Geomagnéticos

A estos observatorios geomagnéticos se les complementa con una Red de Estaciones de Repetición, también conocidas como estaciones seculares, que consta de una serie de puntos fijos distribuidos por la península Ibérica donde se miden las componentes geomagnéticas periódicamente. El objetivo principal de las estaciones de repetición es el de poder determinar la variación media anual de las componentes del campo magnético terrestre (variación secular) en el mayor número posible de puntos y durante un periodo de tiempo lo más grande posible. Esta variación depende del tiempo y del lugar, y conocer su valor es necesario para mantener vigente un mapa magnético, es decir, para su conservación.



La actual Red de Estaciones de Repetición está constituida por 42 estaciones, 39 en la Península y 3 en Baleares, donde se miden las componentes geomagnéticas cada dos o tres años para poder determinar la variación secular. La densidad media de estaciones en la península Ibérica es de una estación por cada 12.500 km², mientras que en las islas Baleares existe una estación en cada una de las islas principales. La distancia media entre estaciones en la península, es de unos 150 km, superior a la recomendada por la IAGA (200 km), para poder detectar rasgos magnéticos con longitudes de onda mayores de 400 km y así poder estudiar la relación del núcleo de la Tierra con la variación secular verdadera.

Los datos obtenidos de la observación de esta Red también son compartidos con organismos internacionales en los que el IGN participa activamente. A nivel europeo, los datos son compartidos con MagNetE (Red Europea de Estaciones Seculares Magnéticas) donde se utilizan, por ejemplo, para la elaboración del Mapa Europeo de Declinaciones Magnéticas. A nivel mundial son compartidos con el World Data Center for Geomagnetism, donde son utilizados para la realización de modelos globales del campo geomagnético como el del IGRF (International Geomagnetic Reference Field), que permite calcular el valor de las componentes del campo geomagnético en cualquier lugar de la Tierra.

En cuanto a la elaboración de la cartografía geomagnética, la década de los 90 también supuso un nuevo punto de inflexión. La aparición de nueva instrumentación, para la observación de campo más precisa y rápida de utilizar, permitió realizar una nueva campaña de observación de estaciones de campo en la que se midieron un total de 752 estaciones, que aportaron datos suficientes para la formación de la cartografía magnética para la época 1995.0. Dichas observaciones se han ido trasladando a partir de los modelos de variación secular, lo que ha permitido seguir publicando la cartografía actualizada cada cinco años. Recientemente se ha publicado el Mapa Geomagnético de España para la época 2015.0 a partir de estas observaciones de campo reducidas para 1995.0 y con el modelo isopórico, obtenido a partir de las observaciones anuales realizadas en la Red de Estaciones de Repetición del IGN.

Meteorología espacial en el IGN

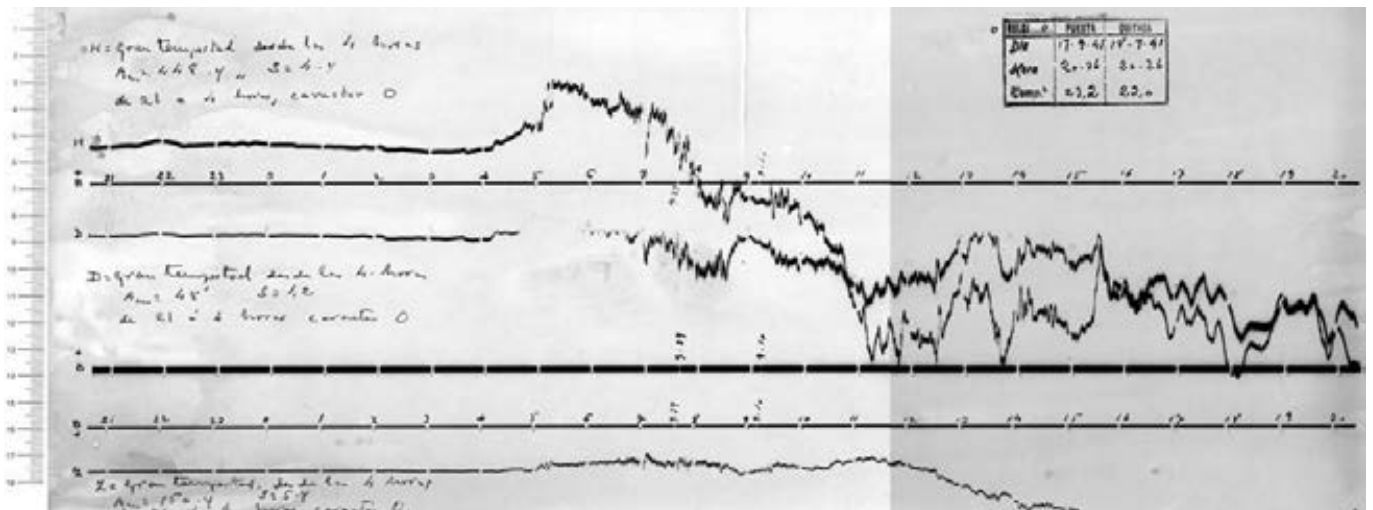
La meteorología espacial se define como el conjunto de condiciones físicas en el entorno espacial cercano a la Tierra, en especial las condiciones de radiación (tanto electromagnética como partículas cargadas eléctricamente) y el estado del campo magnético. En cada momento, dichas condiciones dependen de la actividad solar, que determina el estado del viento solar y de las estructuras transitorias de origen



► Mapa Geomagnético de España de 2015. Hoja de Declinaciones Magnéticas.

solar que se propagan por la heliosfera (eyecciones de masa coronal, regiones de interacción causadas por los agujeros coronales, nubes magnéticas, etc.) hasta alcanzar la Tierra, y de su interacción subsiguiente con la magnetosfera y la atmósfera terrestres. Estos fenómenos son responsables de las perturbaciones del campo magnético terrestre conocidas como tormentas geomagnéticas y uno de sus efectos más espectaculares es la aparición de auroras boreales y australes en la atmósfera terrestre a latitudes altas. La medición, el conocimiento e incluso el pronóstico de las condiciones de meteorología espacial tienen una gran importancia para la prevención y la respuesta ante sus potenciales efectos perjudiciales, que incluyen disfunciones en los sistemas de telecomunicaciones por satélite, radio o cable, problemas en las redes de suministro eléctrico, problemas en los sistemas de canalización metálicos subterráneos, problemas en los sistemas de posicionamiento global por satélite, fallos electrónicos en satélites e incluso daños biológicos de diversa magnitud en las tripulaciones de vehículos espaciales y de aerolíneas comerciales.

El Servicio de Geomagnetismo del IGN desarrolla diversas tareas en el ámbito de la meteorología espacial. En primer lugar, el mantenimiento y operación ininterrumpida de sus dos Observatorios Geomagnéticos en San Pablo de los Montes (Toledo) y Güímar (Tenerife), adscritos a la red internacional de Observatorios Geomagnéticos INTERMAGNET, permite un seguimiento continuo en tiempo real del estado del campo magnético en la superficie terrestre, y por tanto de la ocurrencia y características de las tormentas geomagnéticas. Esta información, además de ser completamente pública, se utiliza para calcular el índice trihorario local K , que da una idea de las condiciones magnéticas locales, y que a su vez alimenta los mensajes del sistema de alerta de ocurrencia de tormentas geomagnéticas que el IGN distribuye al público general, vía Twitter, y a usuarios especializados junto con un informe de la situación de las últimas 24 horas vía *e-mail*. En segundo lugar, ya en el ámbito de la investigación aplicada y desarrollo de nuevas herramientas, el IGN ha instalado y opera una estación experimental de medida de las co-



► Tormenta geomagnética del 17-09-1941 registrada en el Observatorio de Toledo.

rrientes geoelectricas generadas en la corteza terrestre por la ocurrencia de tormentas geomagnéticas, actualmente instalada en el Observatorio de San Pablo de los Montes. Este sencillo dispositivo, consistente en la colocación en tierra de unos electrodos impolarizables enterrados a 70 cm para medir la diferencia de potencial eléctrico, proporciona un registro interesante, cuyo análisis servirá para enriquecer y reforzar aún más el sistema de alertas que el IGN ya tiene operativo. Además, el Servicio de Geomagnetismo del IGN participa en varios proyectos de investigación actualmente en marcha, que incluyen el estudio de la actividad solar y la meteorología espacial mediante la correlación de observaciones simultáneas tanto satelitales, como del campo geomagnético en superficie, como de la llegada a la Tierra de las partículas de alta energía cargadas eléctricamente y conocidas como rayos cósmicos. La actividad solar y las diferentes estructuras del viento solar afectan a la propagación de los rayos cósmicos a través de la heliosfera, viéndose alteradas tanto sus trayectorias como sus tasas de llegada. Estas partículas, que viajan a velocidades relativistas (próximamente a la velocidad de la luz), alcanzan la Tierra en un tiempo menor que el que necesita la perturbación magnética para alcanzar la superficie terrestre. De este modo, las alteraciones en el flujo de rayos cósmicos registrado en tierra, así como el estudio de sus trayectorias, podrían ser buenos precursores de la actividad magnética, permitiendo prevenir y mitigar los daños causados por las tormentas magnéticas cuando lleguen a la atmósfera terrestre y a la superficie. En relación a estos fenómenos, el Instituto Geográfico Nacional participa en la actualidad junto a varias universidades españolas y centros internacionales en el Proyecto del Plan Nacional de Investigación ORCA (Observatorio

de Rayos C6smicos Antártico). Dentro del Geomagnetismo, la meteorología espacial representa un campo puntero en rápida expansi3n, de importancia cada vez mayor debido a la tecnificaci3n creciente de nuestra sociedad. En consonancia con su importancia social, durante los 6ltimos a6os el Servicio de Geomagnetismo del IGN est1 haciendo un esfuerzo especial en potenciar sus actividades en este 1mbito.

Magnetismo ambiental en el IGN

Dentro del geomagnetismo, el magnetismo ambiental se define como el uso de las caracteristicas magnéticas de los sedimentos marinos, lacustres, fluviales y e6licos, así como de los suelos, el polvo atmosférico depositado en diversas superficies y distintos tipos de residuos mineros e industriales, para su caracterizaci3n mineral6gica y textural, incluyendo su evoluci3n temporal y cartografía espacial, y la utilizaci3n de este conocimiento para la investigaci3n y resoluci3n de problemas medioambientales (condiciones actuales) o paleoambientales (condiciones ambientales y climáticas en el pasado).

La medida de las propiedades magnéticas de este tipo de materiales es especialmente sensible a la presencia y caracteristicas de la fracci3n mineral ferromagnética presente en el material, que depende de diversos procesos ambientales y climáticos, tales como las tasas y patrones de erosi3n, transporte y sedimentaci3n, el aporte e6lico, la cantidad de materia orgánica presente en el sedimento y el nivel de actividad biol6gica asociada, los procesos de edafogénesis (formaci3n del suelo), la contaminaci3n antrópica de origen industrial, etc. Por todo ello, esta fracci3n ferromagnética y sus caracte-



► Depósitos industriales oscuros muy ricos en hierro y altamente magnéticos de la playa de Tunnelboca, en la desembocadura de la ría de Bilbao, que están siendo estudiados por el IGN mediante técnicas de Magnetismo Ambiental dentro del Proyecto Antropicosta-2.

terísticas detalladas pueden ser usadas como trazador de los cambios, tanto temporales como espaciales, en dichos procesos ambientales y climáticos. Además, un gran número de fuentes de contaminación antrópica producen cantidades importantes de materiales ferromagnéticos que son redistribuidos por la circulación atmosférica, fluvial y oceánica. Un ejemplo importante es la producción generalizada de micropartículas esféricas altamente magnéticas, compuestas principalmente por los minerales magnetita y hematites, que se genera por la quema de combustibles fósiles (carbón y petróleo, principalmente) en las centrales de generación de energía eléctrica, en los altos hornos, etc., así como los depósitos masivos de minas de hierro, escorias de fundiciones, etc., con presencia de material ferromagnético en altos porcentajes. Es evidente el gran interés, no sólo científico sino principalmente social, que tiene este campo de trabajo y todos aquellos que estén destinados a la resolución e investigación de problemas medioambientales, ya que estos problemas se encuentran entre los más graves que afectan a nuestra sociedad en el presente y con toda seguridad aumentarán su importancia en el futuro.

Desde el Servicio de Geomagnetismo del Observatorio Geofísico Central del IGN, se está desarrollando en los últimos años una línea de trabajo de magnetismo ambiental. Dentro de esta línea figura, como elemento clave, la creación de un Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental con instrumentación propia, cuyo objetivo es permitir abordar distintos estudios ambientales y paleoambientales, así como ofrecer la posibilidad a investigadores y grupos externos

de efectuar medidas relacionadas con proyectos en este ámbito. Actualmente, el laboratorio está siendo dotado de equipos de medida de la susceptibilidad magnética en función de la frecuencia y la temperatura, además de diversos sensores de campo y, de modo relevante, con un sistema de medida de testigos enteros de material sedimentario procedentes de perforaciones.

El magnetismo ambiental tiene un gran interés en los estudios sobre el cambio climático

Además, el personal del área de Magnetismo Ambiental del IGN participa actualmente en diversos proyectos de investigación centrados en distintos problemas medioambientales: por una parte, en el estudio de la evolución ambiental y el grado de contaminación industrial registrada en los sedimentos muy recientes (últimos cientos de años) de algunas de las zonas más importantes de desarrollo industrial de la costa atlántica norte española (rías de Bilbao, Avilés, Vigo y también en Mondego, en Portugal, así como del estuario del río Oka, en la Reserva Natural de Urdaibai); por otra parte, en estudios que analizan sedimentos recientes de diversas perforaciones del Mediterráneo, con el objetivo de obtener información paleoclimática y acerca de los cambios en la productividad biológica, la desoxigenación y el aporte eólico durante los últimos miles de años, con el objetivo de usar esta información para anticipar los cambios del mismo tipo esperables para el Mediterráneo en el futuro próximo, dadas las condiciones actuales de cambio climático y calentamiento global. Por último, se trabaja también en el análisis de sedimentos lacustres recientes procedentes de varios lagos de montaña de la cordillera cantábrica, con el objetivo de investigar los cambios ambientales, tanto naturales como antrópicos, registrados en dichos lagos. Todos estos estudios, que analizan los sedimentos investigados desde un punto de vista siempre multidisciplinar, incluyen la medida sistemática de sus características magnéticas y su posterior correlación con otros indicadores para obtener una interpretación ambiental conjunta, trabajo del que se encarga el personal del Servicio de Geomagnetismo del IGN que participa en los citados proyectos.

J. M. Tordesillas García-Lillo y Víctor Villasante Marcos
Fotos: IGN