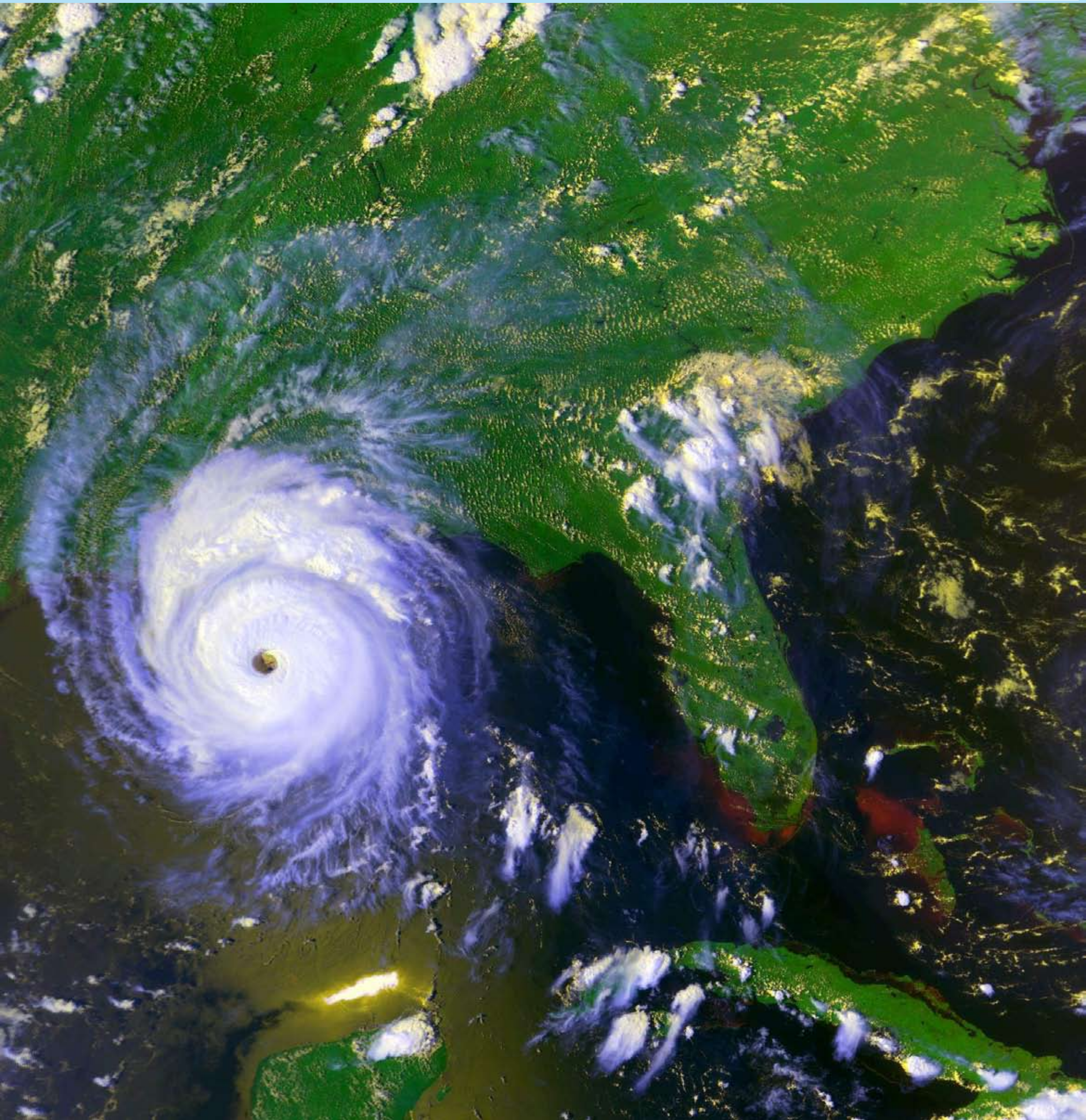
Guía Didáctica de

Teledetección y Medio Ambiente

Red Nacional de Teledetección Ambiental

Javier Martínez Vega y M.Pilar Martín Isabel (Eds.)
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)



Esta Guía Didáctica ha sido elaborada en el marco de la Red Nacional de Teledetección Ambiental, financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de la Acción Complementaria CGL2008-03392-E/CLI.

La Unidad de Edición Digital y Diseño Gráfico del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas ha asesorado en el diseño y maquetación de la presente obra.

Los autores y editores de la guía agradecen a las personas e instituciones involucradas en su publicación, su inestimable colaboración.

Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente

Red Nacional de Teledetección Ambiental

Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente

Editores:

Javier Martínez Vega y M. Pilar Martín Isabel
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)

Autores colaboradores:

Javier Martínez Vega
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)

M. Pilar Martín Isabel
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)

José Manuel Díaz Montejo
Colegio Concertado San Gabriel (Alcalá de Henares, Comunidad de Madrid)

José María López Vizoso
Facultad de Humanidades (Universidad de La Coruña)

Francisco Javier Muñoz Recio
Instituto de Enseñanza Secundaria Parque Aluche (Comunidad de Madrid)

Maquetistas:

Javier Martínez Vega
Javier Pérez Gutiérrez

Copyright © 2010 Red Nacional de Teledetección Ambiental.

En portada: Imagen GOES del Huracán Andrew, captada el 25 de agosto de 1992.
Fuente: www.visibleearth.nasa.gov





MADRID. 2000. Imagen ASTER de la ciudad de Madrid y de su área metropolitana

Fuente: http://asterweb.jpl.nasa.gov

LOS AUTORES

Dr. Javier MARTÍNEZ VEGA
Científico Titular
Instituto de Economía, Geografía y Demografía
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)

E-mail: javier.martinez@cchs.csic.es
http://www.investigacion.cchs.csic.es/espectroradiometria/personal



Su principal línea de investigación es la cartografía de ocupación y uso del suelo y la detección de cambios. Trabaja con imágenes multiespectrales de media y alta resolución espacial (LANDSAT-TM y ETM, SPOT-HRV y HRG) y con ortofotografías aéreas.

Está interesado en la conexión de la Teledetección con los Sistemas de Información Geográfica. Se encuentra involucrado en el análisis del riesgo humano de incendios forestales.

Participa en la Red Nacional de Teledetección Ambiental y ha sido Vicepresidente de la Asociación Española de Teledetección desde 2005 hasta 2009. Actualmente es el Presidente del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica de la Asociación de Geógrafos Españoles.

Ha sido Profesor Asociado del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá entre 1989 y 2000.

Dra. M. Pilar MARTÍN ISABEL
Investigadora Científica
Instituto de Economía, Geografía y Demografía
Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)

E-mail: mpilar.martin@cchs.csic.es
http://www.investigacion.cchs.csic.es/espectroradiometria/personal



Su principal línea de investigación está relacionada con las aplicaciones ambientales de la Teledetección (incendios forestales, generación de variables biofísicas, agricultura de precisión) y de los Sistemas de Información Geográfica (factores de riesgo humano de incendios forestales, valoración y representación del paisaje).

Ha sido la comisaria de la Exposición Teledetección y Medio Ambiente que se organizó, en el marco de la Semana de la Ciencia, en el CSIC durante las ediciones de 2002, 2003 y 2004. Esta actividad científica ha sido el origen de la presente guía didáctica que lleva el mismo nombre.

Igualmente, participa en la Red Nacional de Teledetección Ambiental. Es Profesora Asociada del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá.



José Manuel DÍAZ MONTEJO
Profesor
Colegio Concertado San Gabriel
Alcalá de Henares, Comunidad de Madrid

E-mail: montejodebricia@yahoo.es

Es maestro en la especialidad de Ciencias. Actualmente, es responsable de las áreas de Ciencias de la Naturaleza y Tecnología en el Primer Ciclo de ESO. Tiene experiencia y responsabilidades docentes en materias relacionadas con la Geografía y las Ciencias Ambientales.

En la actualidad, está complementando sus estudios universitarios con la licenciatura en Ciencias Ambientales en la Universidad de Alcalá.

Ha coordinado las secciones de volcanes, procesos de deforestación y avance de la frontera agrícola, actividades mineras y grandes infraestructuras.



Dr. José María LÓPEZ VIZOSO
Profesor Titular
Facultad de Humanidades
Universidad de La Coruña

E-mail: jmvizoso@cdf.udc.es

Es doctor en Geografía y profesor de Universidad, en el área de conocimiento de Análisis Geográfico Regional. Tiene experiencia y responsabilidades docentes en materias relacionadas con la Geografía y con otras ciencias afines con un claro componente ambiental. Ha sido Director del Departamento de Didácticas Especiales, Secretario del Departamento de Humanidades y Secretario y Vicedecano de la Facultad de Humanidades.

En los años ochenta y noventa fue contratado en el área de Teledetección del Instituto Geográfico Nacional. Entre otras responsabilidades, fue adjunto del coordinador del proyecto CORINE-Land Cover en España. Formó parte de la Comisión de Cartografía Temática y Teledetección de la Asociación Cartográfica Internacional. Fue becario postdoctoral en el Instituto de Economía y Geografía del CSIC y, más tarde, fue colaborador en el Gabinete de Planificación de la Xunta de Galicia.

Ha coordinado la sección de vertidos de petróleo al mar.

Francisco Javier MUÑOZ RECIO
Profesor
Instituto de Enseñanza Secundaria Parque Aluche
Comunidad de Madrid

E-mail: remujavier@hotmail.com

Es licenciado en Geografía. Es profesor de ESO y Bachillerato. Tiene experiencia y responsabilidades docentes en materias relacionadas con la Geografía y las Ciencias Ambientales.

Es gran conocedor de la ciudad de Madrid y de su Área Metropolitana. Sensible a la importancia de las Tecnologías de Información Geográfica y de los sistemas espaciales de observación de la Tierra se ha responsabilizado de organizar jornadas de enseñanza y divulgación de estas tecnologías en su centro, dirigidas a los alumnos de Bachillerato.

Se ha encargado de los comentarios de las imágenes de Madrid.

Javier PÉREZ GUTIÉRREZ

E-mail: javick_peg@hotmail.com

Es licenciado en Geografía. Financiado por la Red Nacional de Teledetección Ambiental, se ha encargado de revisar y actualizar la selección de imágenes contenidas en la guía. También ha colaborado en las etapas iniciales de maquetación.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción 1

2. Historia de la Teledetección..... 2

3. Nociones básicas de Teledetección..... 4

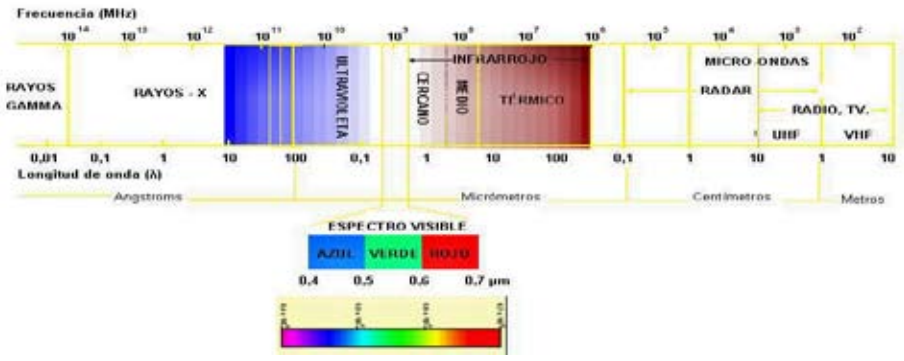
4. Teledetección: herramienta de información espacial..... 9

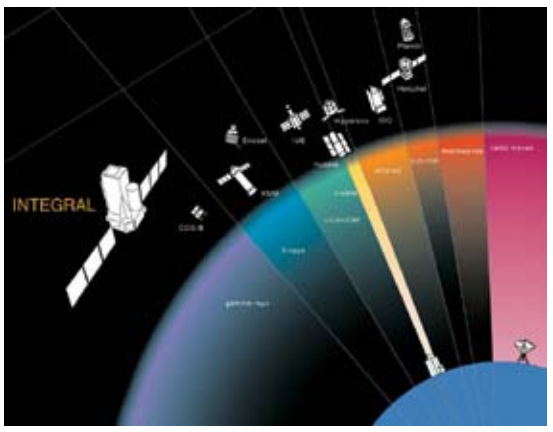
4.1. Visión global 9
4.2. Información sobre regiones no visibles del espectro 11
4.3. Observación a distintas escalas 12
4.4. Frecuencia de adquisición 14
4.5. Homogeneidad en la adquisición 15
4.6. Otras ventajas 15

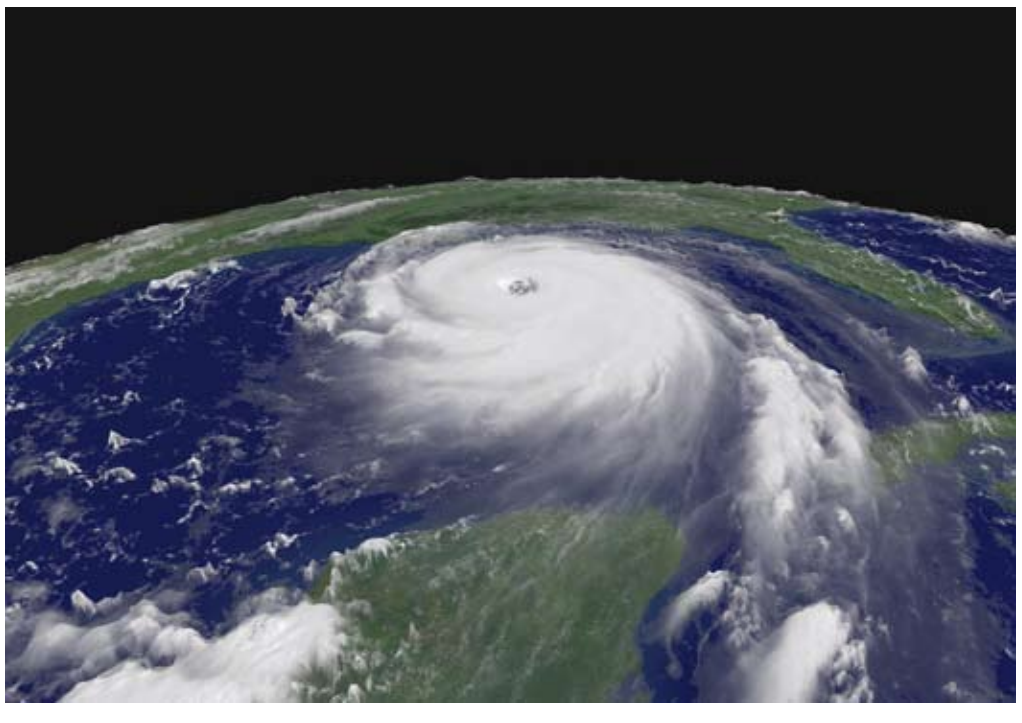
5. Fenómenos naturales 16

5.1. Riesgos naturales 16
5.1.1. Huracanes 16
5.1.2. Volcanes 29
5.1.3. Inundaciones 48
5.1.4. Terremotos 60
5.1.5. Deslizamientos de ladera 68

5.2. Otros fenómenos naturales 70
5.2.1. Tormentas de arena 70
5.2.2. Geoformas 74
5.2.3. Ríos y masas de agua 85
5.2.4. Glaciares 104





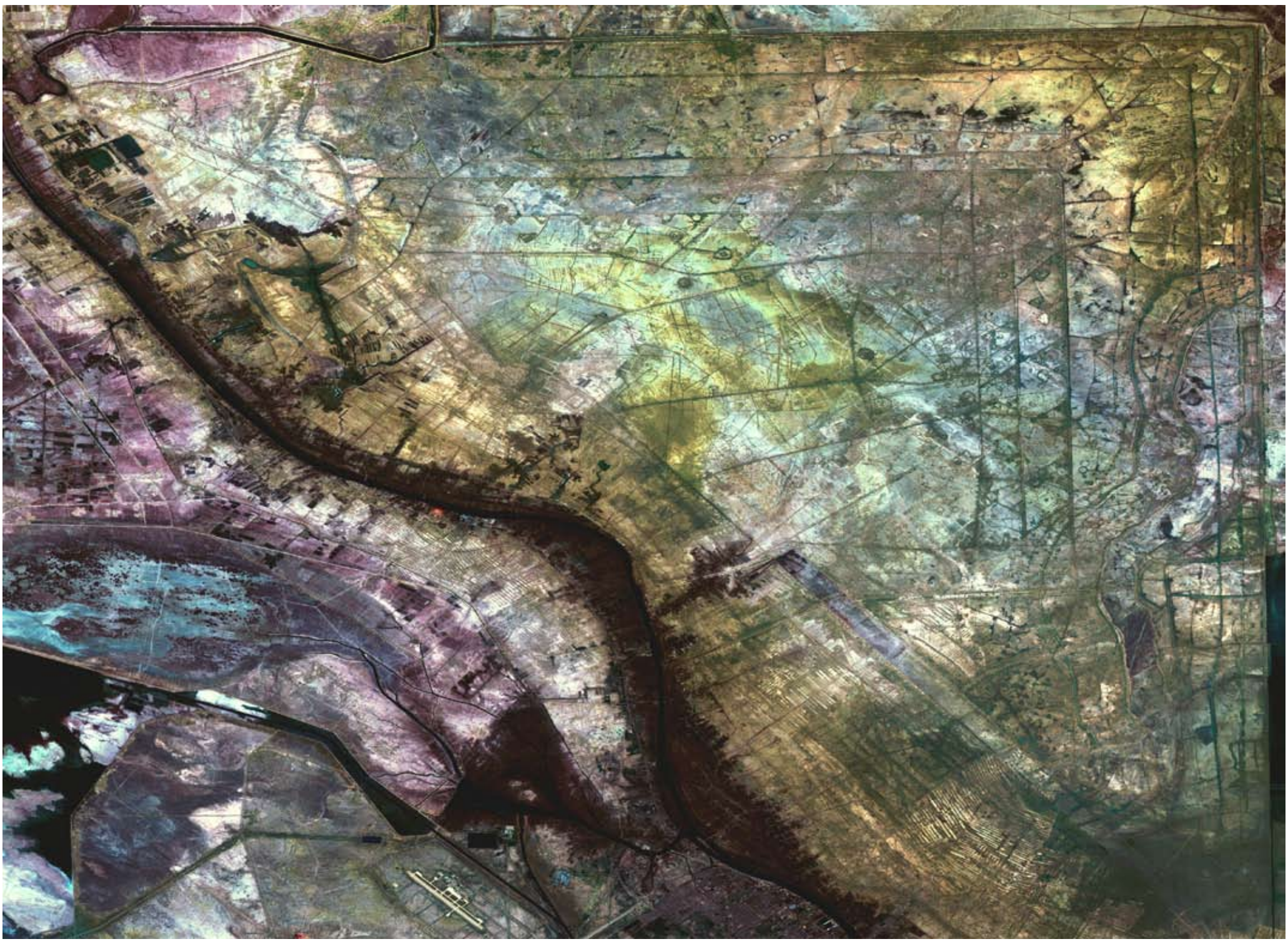




6. Impactos ambientales 110

6.1. Modelos de ocupación del suelo en el mundo 110
6.2. Procesos de deforestación y avance de la frontera agrícola 118
6.3. Incendios forestales 126
6.4. Desecación de masas de agua y de zonas húmedas 135
6.5. Eutrofización de masas de agua 140
6.6. El proceso de urbanización en el mundo. Modelos de ciudades 146
6.7. Vertidos de petróleo al mar 165
6.8. Guerras y terrorismo 174
6.9. Actividades mineras 178
6.10. Grandes infraestructuras 184

7. Bibliografía y referencias 196





1. INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado, los ciudadanos están informados, a diario, sobre la presencia y los efectos de diversos fenómenos naturales tales como los terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, incendios forestales o inundaciones, entre otros.

Adicionalmente, los medios de comunicación prestan, cada día, más atención a otros fenómenos propiciados por los grupos humanos que generan, igualmente, impactos preocupantes sobre el medio ambiente. Se informa acerca de las últimas investigaciones focalizadas sobre las amenazas que preocupan, principalmente, a la humanidad, como la fusión de las masas de hielo y la constante reducción de su volumen y superficie en distintas zonas del planeta como consecuencia del calentamiento global. Asimismo, el avance de la frontera agrícola y la deforestación de las selvas ecuatoriales y tropicales, ocasionados por un modelo insostenible de desarrollo, las quemas de extensas masas forestales y de áreas protegidas, debidas a negligencias humanas, o los vertidos de petróleo al mar son algunos ejemplos de las pérdidas ambientales ocasionadas por el hombre.

Lógicamente, estos acontecimientos generan preocupación en la sociedad y, a la vez, contribuyen a modelar su conciencia ambiental, de tal manera que aquélla movilice recursos humanos y económicos para luchar contra estos eventos desde campos diversos como el político, jurídico e, incluso, desde el plano de la solidaridad y la cooperación.

Esta guía didáctica de Teledetección y Medio Ambiente pretende ser principalmente, como su nombre sugiere, una herramienta docente de utilidad para los profesores que imparten asignaturas relacionadas con las Ciencias de la Tierra en el Bachillerato y en el último ciclo de la Enseñanza Secundaria Obligatoria. Como señala el adagio popular, consideramos que una imagen vale más que mil palabras. Por ese motivo, en esta guía, las imágenes de satélite, junto a otras imágenes y fotografías, son las protagonistas. Se ha procurado seleccionar aquellas imágenes que ilustran hechos y procesos ambientales relevantes que preocupan a la sociedad, geoformas características que llaman la atención del observador y que son claramente visibles e identificables desde el espacio.

Asimismo, se ha priorizado la selección de imágenes captadas por diversos instrumentos, desde variadas plataformas de observación de la Tierra, de tal forma que el docente y el lector puedan disponer de un amplio repertorio de imágenes, con características y resoluciones complementarias.

Las imágenes van acompañadas de un texto sencillo para facilitar la comprensión de los alumnos y de los lectores, en general. Los autores pretenden llamar la atención sobre los rasgos más llamativos de cada imagen.

Además de esta función educativa, esta guía pretende ser un vehículo de concienciación ambiental con objeto de que nuestros jóvenes se sensibilicen ante las catástrofes naturales, que ocurren todos los años, y ante los impactos ambientales provocados por nuestro modelo de desarrollo económico. Quizás, algún día, sean artífices o contribuyan al cambio hacia un nuevo modelo de desarrollo sostenible.

La estructura temática de la guía es sencilla. La primera parte se centra en un breve repaso a la historia de la Teledetección, poniendo énfasis en los principales hitos que han marcado el progreso de esta tecnología de información geográfica. Incluye un capítulo introductorio sobre los principios físicos de la Teledetección, de forma que, de una manera muy gráfica, los alumnos comprendan cómo observan la Tierra los satélites y cómo se registran, visualizan e interpretan las imágenes captadas desde el espacio. Asimismo, se relacionan las principales ventajas de la Teledetección frente a otros sistemas de observación de la Tierra más convencionales como la fotografía aérea o la visión directa desde una perspectiva oblicua. El núcleo fundamental de la guía son los capítulos 5º y 6º, dedicados a ilustrar fenómenos naturales e impactos humanos de distinta naturaleza. En resumen, se pretende proporcionar un repertorio de recursos didácticos a los profesores para facilitarles la enseñanza de la Teledetección y de asignaturas relacionadas con el Medio Ambiente.

Esperamos que esta obra sea provechosa para los profesores, alumnos y público, en general, interesados en la observación de la Tierra y en la conservación de sus más preciados recursos naturales.

Izquierda: DUBAI. 2006. Imagen ASTER de DUBAI y de las nuevas áreas de ocio y recreativas en las islas artificiales con forma de palmera.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

2. HISTORIA DE LA TELEDETECCIÓN









1859

En 1859, bajo el seudónimo de Nadar, Gaspard Felix Tournachon utilizó un globo para realizar las primeras fotografías aéreas sobre el bosque de Boulogne y el Arco del Triunfo. Intuyó que era posible la aplicación de la fotografía aérea a los levantamientos topográficos y catastrales.

De forma paralela, James Wallace Black registró una de las primeras fotografías aéreas sobre el distrito de negocios de Boston desde un globo, a una altitud aproximada de 365 metros.

1909

En 1903 Orville Wright se convirtió en la primera persona en volar sobre una aeronave, el *Flyer*, más pesada que el aire. Otros especialistas consideran a Alberto Santos Dumont el protagonista de esta hazaña, ya que voló, en septiembre de 1906, a bordo del *14-bis* sin ayudas externas.

Poco más tarde, en 1909, Wilburg Wright adquirió la primera fotografía captada desde un avión, iniciando un largo y fructífero periodo de campañas y misiones fotográficas, que se prolongan hasta la actualidad, con fines militares y civiles y aplicaciones temáticas muy variadas.

1915

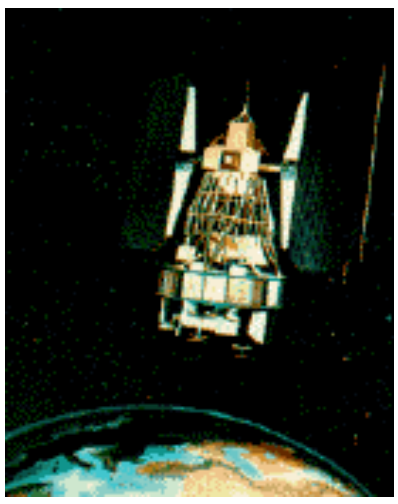
En 1915, J.T.C. Moore-Brabazon desarrolló la primera cámara aérea de la historia, diseñada específicamente para ser accionada desde un avión.

Durante la I Guerra Mundial se registró un gran número de misiones fotográficas de reconocimiento. Enseguida se comprendió la gran importancia estratégica de esta nueva información geográfica para los ejércitos contendientes. Los aviones de reconocimiento se convirtieron en objetivos prioritarios.

En el periodo de entreguerras las nuevas emulsiones favorecieron nuevas aplicaciones.

1945

La II Guerra Mundial fomentó definitivamente el empleo sistemático de la fotografía aérea gracias a los avances de la técnica fotográfica (óptica de las cámaras de reconocimiento y de las emulsiones utilizadas), de la aviación (plataformas más estables) y a la continua demanda de información geográfica. Los fotointérpretes fueron entrenados para realizar tareas complejas de identificación directa de los objetos o mediante deducción. En esta época se comenzaron a utilizar las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por Kodak. Asimismo, se introdujeron nuevos sensores como el radar y se utilizaron, habitualmente, los pares estereoscópicos.









1972

Los éxitos acumulados por la NASA, hicieron concebir nuevos proyectos focalizados en la cartografía y evaluación de recursos naturales. El 23 de julio de 1972 se puso en órbita el primer satélite de la serie *ERTS (Earth Resources Technollogy Satellite)*, rebautizada *LANDSAT*, a partir de 1975. Esta familia de satélites ha sido la más fructífera en aplicaciones civiles de la teledetección. Los estudios han crecido de forma exponencial y han incidido en temáticas muy diversas.

1981

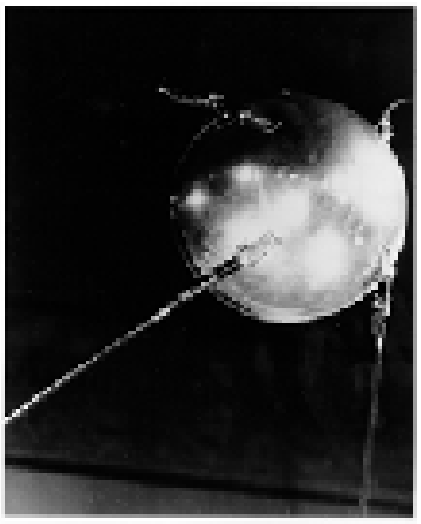
En 1981, el lanzamiento del transbordador espacial *Space Shuttle* supuso un nuevo hito en la carrera espacial. A lo largo de las veinte misiones que se sucedieron entre 1981 y 1994 se obtuvieron 45.000 fotografías espaciales, de dominio público. Entre todas, merece la pena destacar las fotografías estereoscópicas obtenidas desde esta plataforma tripulada por las cámaras métricas RMK (Zeiss) y de gran formato (Itek) con objeto de probar sus aptitudes para generar cartografía topográfica básica de escalas medias, a bajo coste, en los países menos desarrollados.

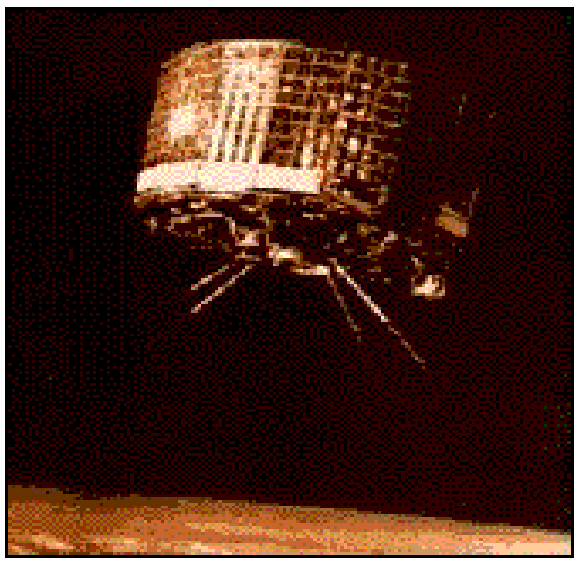
1986

En 1986, Francia, en colaboración con Bélgica y Suecia, lanza el satélite *SPOT* (Système Pour l'Observation de la Terre). Este satélite, de órbita heliosíncrona, tiene una repetitividad de 26 días. Se han lanzado otros cuatro satélites de la misma familia en 1990, 1993, 1998 y 2002. El sensor *HRV* (Haute Résolution Visible) dispone de una tecnología de exploración por empuje. Incorpora la posibilidad de captar escenas verticales y oblicuas en dos órbitas sucesivas, gracias a lo cual es posible disponer de imágenes estereoscópicas.

1991-1995

En 1991, la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzó su primer satélite de teledetección, el *ERS-1* (European Remote Sensing Satellite). En 1995, se lanzó el segundo satélite de esta serie, el *ERS-2*. Su objetivo era complementar a los sensores ópticos embarcados en *Landsat* y *SPOT*. Aunque sus aplicaciones han sido muy variadas, se orientaban al estudio de los oceános y de la criosfera. Junto a los sensores activos de tipo radar, se han embarcado otros dispositivos de barrido térmico, altímetros y medidores de ozono.







1957

En 1957, la desaparecida URSS lanzó el primer satélite artificial, el *Sputnik*, en el contexto de lo que se ha denominado “carrera espacial”. Se trata de un hito histórico de gran importancia para la Teledetección, ya que esta misión y esta plataforma inauguran una nueva época para la observación de la Tierra. Ha sido seguida de numerosas misiones civiles y militares. Se dice que en los últimos 50 años, la cartografía ha avanzado más que a lo largo de toda su historia, cumpliendo la intuición de Sócrates de que era necesario elevarse más allá de la atmósfera para conocer mejor nuestro planeta y disponer de un punto de vista más global.

1960

En 1960, la NASA puso en órbita el primer satélite de observación de la Tierra, *TIROS-1*, pionero de la investigación meteorológica desde el espacio. Ésta es una de las aplicaciones claramente operativas desde la década de los años 70. Desde 1979, los satélites de esta familia pasaron a denominarse *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*, como la agencia meteorológica responsable de sus operaciones. Una de las principales ventajas de este satélite, de órbita polar, es su buena resolución temporal. Proporciona una imagen cada 6 horas, en nuestras latitudes, gracias a la sincronización de dos satélites.

1961

En la década de los años 60, junto a los satélites artificiales, las misiones tripuladas aportaron más de 35.000 imágenes tomadas por los astronautas, conscientes del interés científico de las mismas. Las primeras fueron tomadas por Alan B. Shepard durante una de las misiones de la plataforma *Mercury*, en 1961. Entre 1965 y 1966, se desarrolló el programa *Gemini*. Sus investigaciones geológicas y oceanográficas permitiron obtener 2.400 fotografías desde el espacio. Los astronautas fueron adquiriendo un creciente entrenamiento en Ciencias de la Tierra, Meteorología y Oceanografía. Desarrollaron una sensibilidad especial para

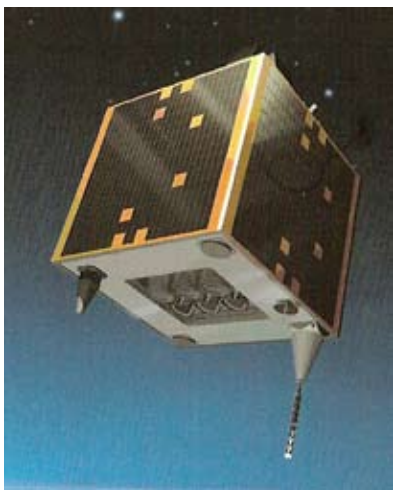
1969

captar megaformas, gracias a la visión global, junto a numerosos fenómenos naturales y humanos de interés, anticipando, en ocasiones, la aparición de desastres.

Más tarde, las misiones Apollo ensayaron nuevos experimentos científicos. Desde *Apollo-6* se obtuvieron 750 fotografías de alta resolución espacial, estereoscópicas, en color. En *Apollo-9* se embarcaron cuatro cámaras Hasselblad con filtros multiespectrales y películas en blanco y negro sensibles a distintas longitudes de onda y en infrarrojo color.









1999

En septiembre de 1999, se lanza el satélite *IKONOS-2,* con 1 m. de resolución espacial. De esta manera, Space Imaging, ahora integrada en la empresa Geoeye, inaugura el mercado de los satélites comerciales de teledetección, ocupando un segmento comercial -el de las observaciones de alta resolución espacial- hasta entonces reservado a la fotografía aérea. En octubre de 2001, la empresa Digital Globe lanza el satélite *QuickBird*, con dos cámaras de alta resolución espacial, 61 cm. en modo pancromático y de 2,5 m., en modo multiespectral.

1999-2002

En diciembre de 1999, la NASA lanza el satélite *TERRA*. Unos años más tarde, en mayo de 2002, se pone en órbita el satélite *AQUA*. Ambas plataformas forman parte del ambicioso programa EOS (Earth Observing System), un sistema de observación global de la Tierra que organiza los satélites participantes en torno a una constelación. Los sensores embarcados (ASTER, MODIS, CERES, MISR, MOPPIT, entre otros) se complementan para generar variables de gran interés ambiental y estudiar procesos globales.

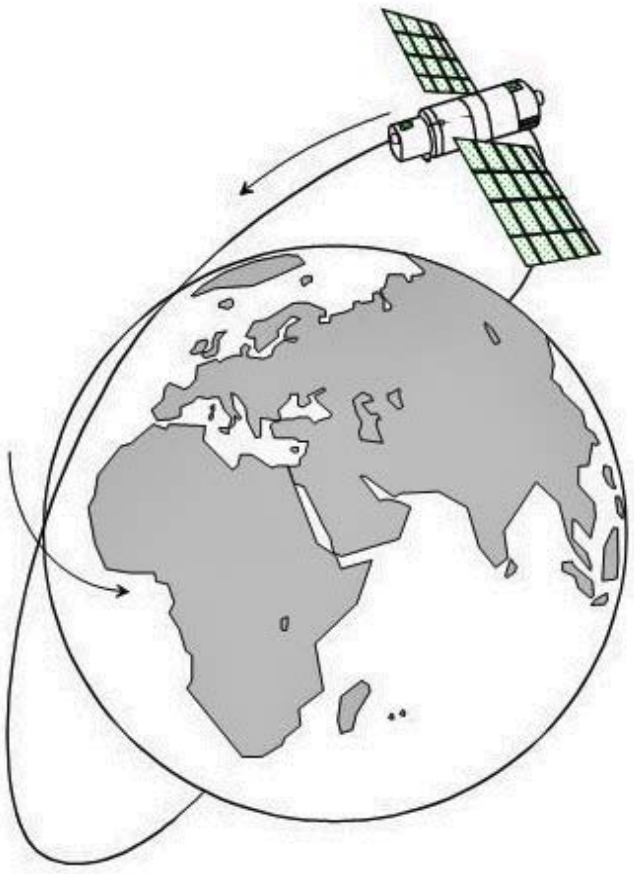
2009

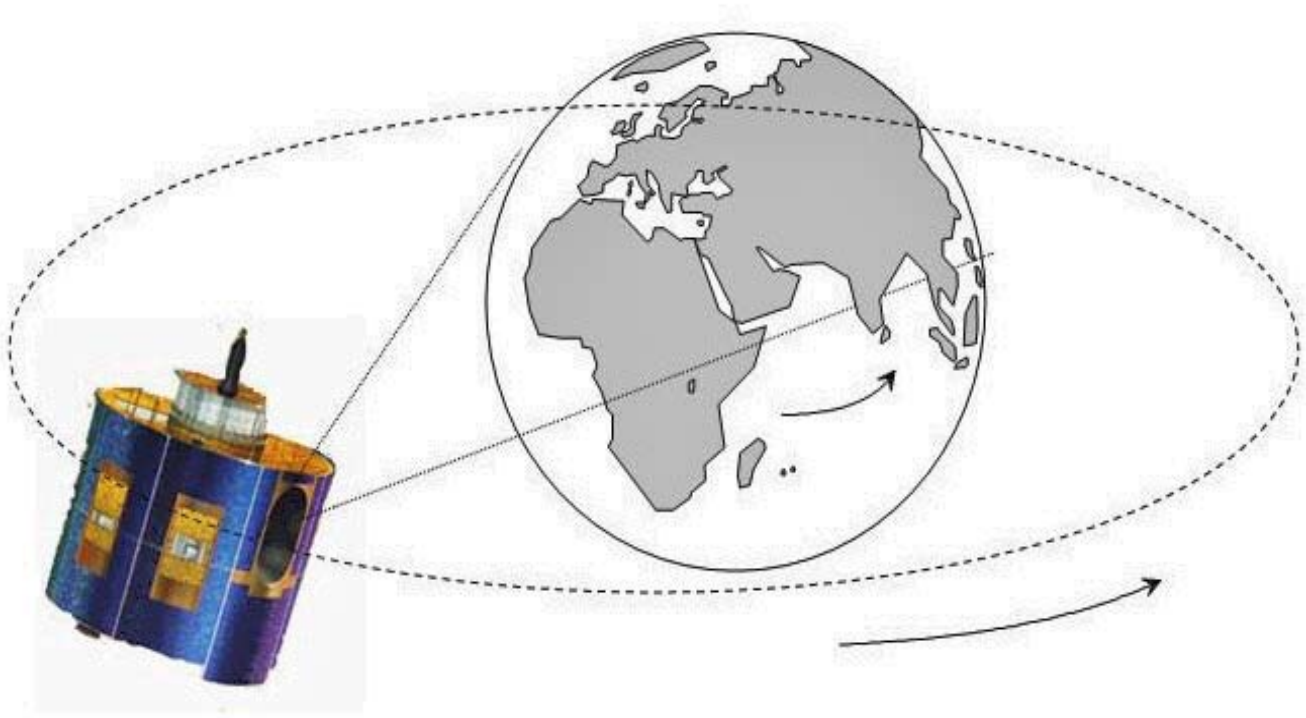
El 29 de julio de 2009, Deimos Imaging (DMI) lanza, con éxito, el primer satélite de observación de la Tierra, *DEIMOS-1,* explotado por una empresa española privada. Se trata de una plataforma de órbita heliosíncrona, a 680 km. de altitud. Dispone de 6 cámaras que captan información en las regiones espectrales del verde, rojo e infrarrojo próximo, con una resolución espacial de entre 20 y 22 m. Se espera que cubra múltiples aplicaciones desde los estudios de agricultura y ocupación del suelo hasta la gestión de recursos naturales y prevención de desastres.

2009

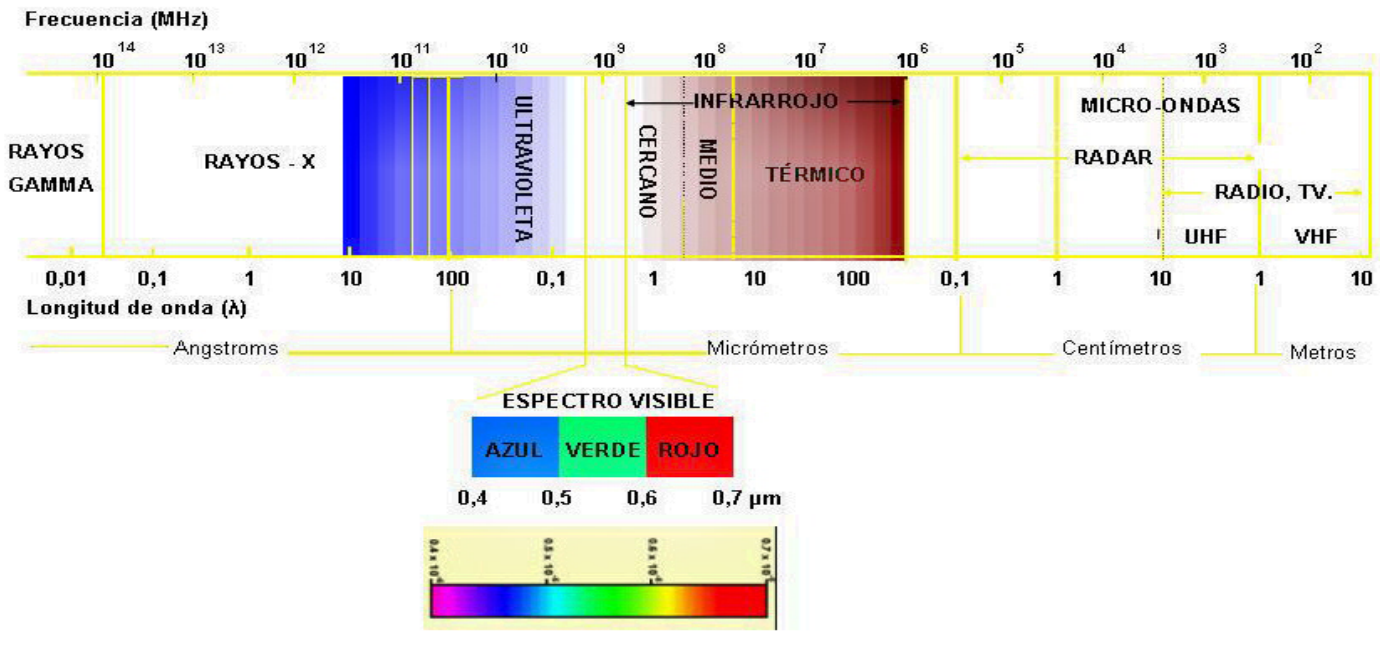
La ESA (Agencia Espacial Europea) lanza, con éxito, el 2 de noviembre de 2009, el satélite *SMOS*. Para España es relevante esta misión porque el responsable científico de la misma es un investigador del CSIC. Además, el único instrumento de la carga útil (MIRAS) ha sido completamente fabricado por la industria española y el procesado de los datos se realizará desde la estación de Villafranca del Castillo. Su objetivo es medir la humedad del suelo y la salinidad de los océanos.

3. NOCIONES BÁSICAS DE TELEDETECCIÓN

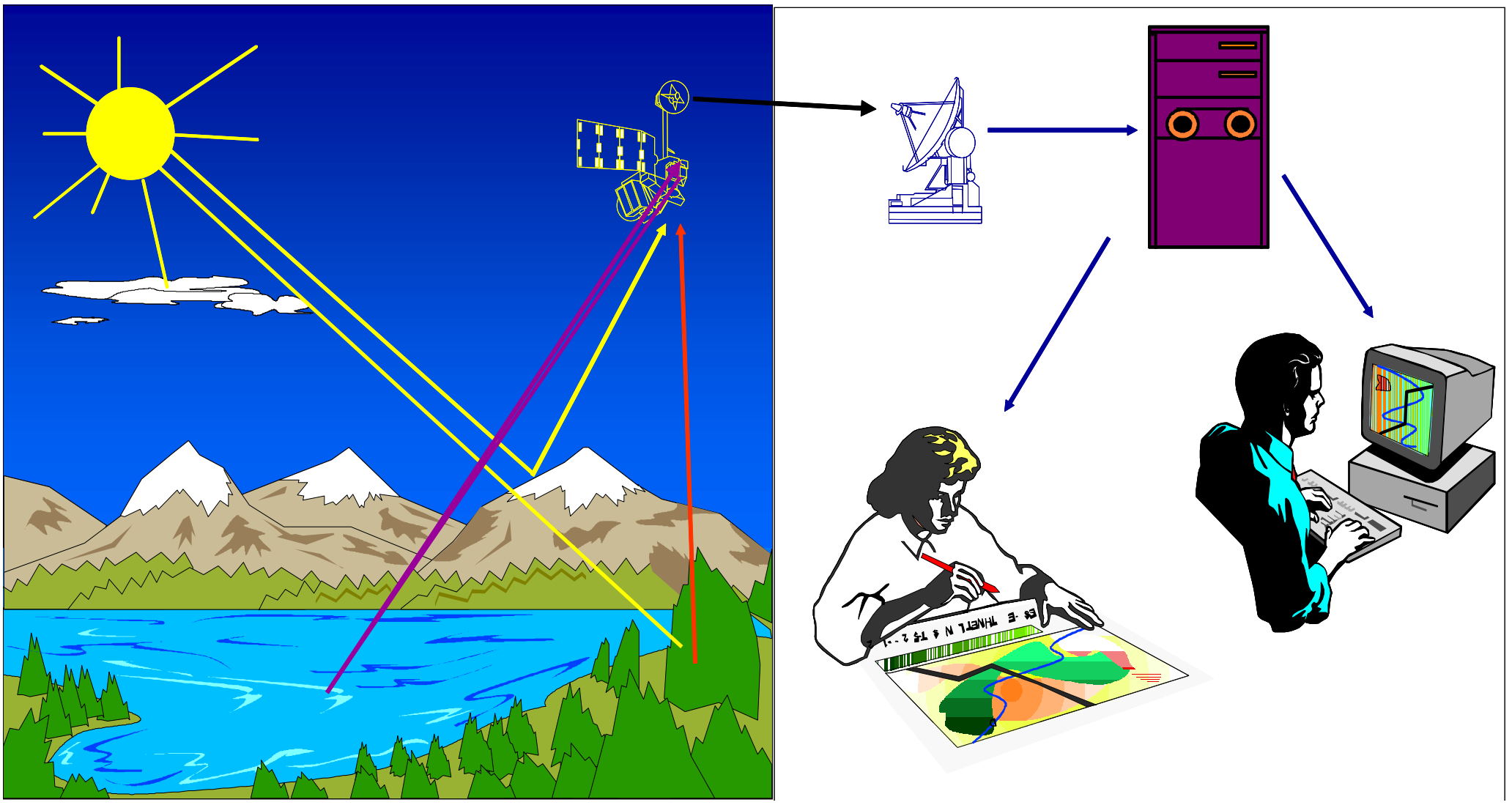




Figuras 1 (a la izquierda) y 2 (arriba): órbitas polar y geoestacionaria de un satélite, respectivamente. Tomadas de Chuvieco, 2008.
Figura 3 (abajo en el centro): Espectro electromagnético. Tomada de Chuvieco, 2008
Figura 4 (abajo): Componentes de un sistema de Teledetección. Tomada de Chuvieco, 2008



Los satélites de observación de la Tierra describen dos tipos de órbitas, heliosíncronas (figura 1) y geoestacionarias (figura 2). Las primeras suelen ser casi polares, estando inclinadas 90º respecto al plano del Ecuador. La órbita es perpendicular al movimiento de rotación de la Tierra por lo que es posible observar zonas distintas del planeta en cada pasada. Suelen sobrevolar el Ecuador a la misma hora, de tal manera que registran imágenes en condiciones de iluminación homogéneas en las mismas épocas. Suelen orbitar a altitudes comprendidas entre 600 y 900 km. Esta órbita es la más habitual en los satélites de recursos naturales de media y alta resolución espacial como Landsat, SPOT, IRS, IKONOS,



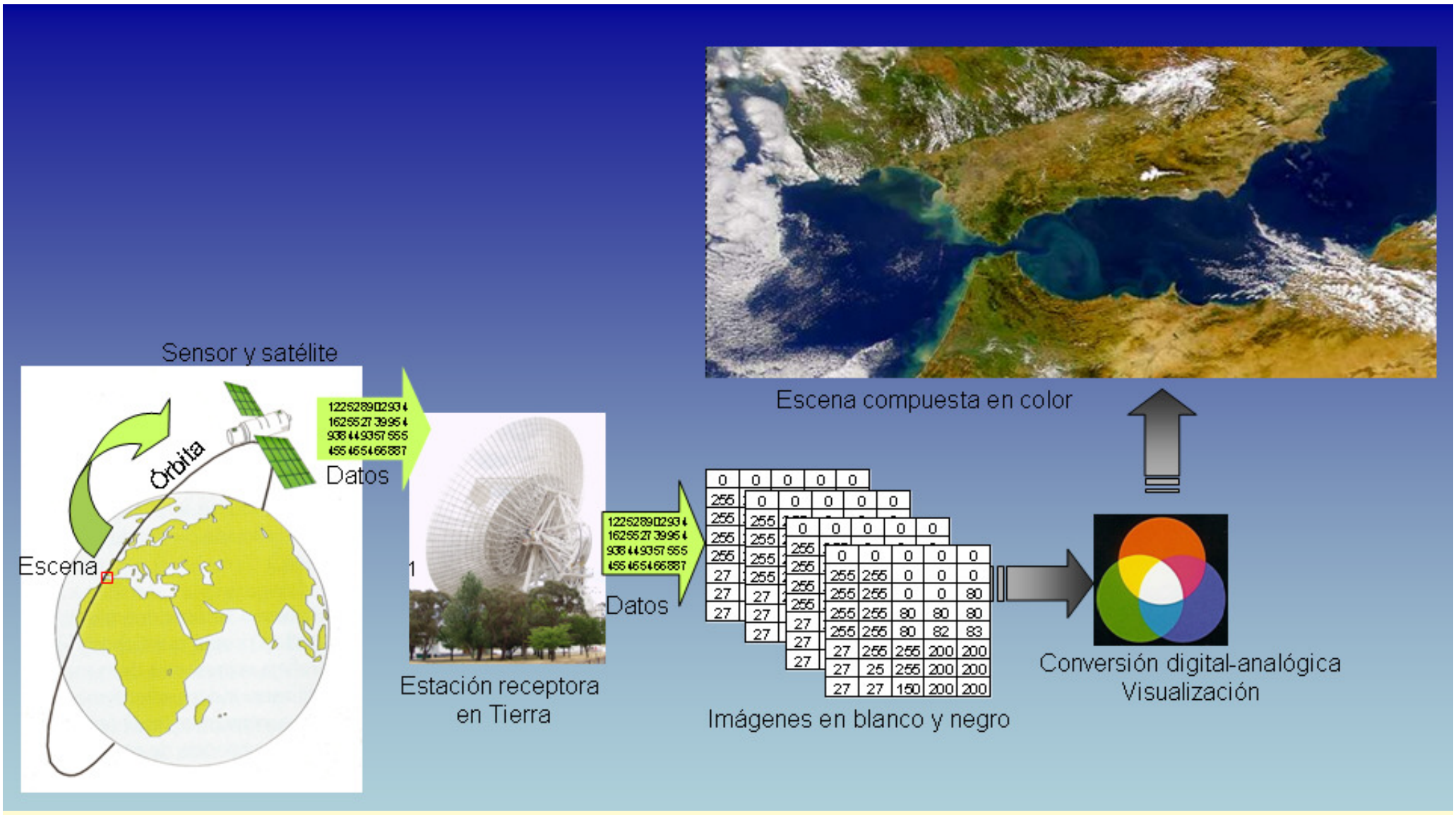


Figura 5: Flujo de trabajo desde la recogida de información hasta su procesado. Fuente: Javier Martínez Vega

Terra y Aqua, aunque existen otros satélites meteorológicos de órbita polar y media resolución espacial como NOAA.

Las órbitas geoestacionarias son ecuatoriales, a una altura de 36.000 km. Su periodo orbital es similar a la velocidad de rotación de la Tierra por lo que su posición relativa respecto a nuestro planeta siempre es la misma, registrando imágenes sobre la misma porción de superficie terrestre. La mayor parte de satélites de comunicaciones y meteorológicos son geoestacionarios. Suelen complementarse en constelaciones, de tal manera que un conjunto de satélites cubran toda la superficie terrestre. Por ejemplo, Meteosat está posicionado sobre el meridiano 0º, observando Europa y África y GOES sobre los meridianos 70 y 140º W, registrando los meteoros de las costas Este y Oeste de América del Norte, respectivamente. A pesar de su escasa resolución espacial, como consecuencia de su elevada altura orbital, disponen de gran resolución temporal. Son capaces de ofrecer imágenes cada media hora, permitiendo un seguimiento temporal de fenómenos dinámicos.

El ojo humano es el sensor natural con el que percibimos la información de la superficie terrestre. Sin embargo, éste se encuentra limitado a la región espectral del visible (figura 3). Por el contrario, los sensores que viajan a bordo de los satélites artificiales suelen ser multiespectrales e, incluso, hiperespectrales. Ello significa que son capaces de registrar el comportamiento de los objetos de la superficie terrestre en diversas longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético, desde la región del visible hasta las distintas bandas del infrarrojo (próximo, medio y térmico) y de las microondas.

En la figura 4 se muestran los componentes de un sistema de Teledetección. El primer componente es la fuente de energía. La más habitual es el sol, en cuyo caso se habla de Teledetección pasiva ya que los sensores dependen de esta fuente de energía externa.

El segundo componente es la cubierta terrestre. Cada grupo de objetos de la cubierta (masas de vegetación, mantos de nieve, cuerpos de agua, suelos o superficies urbanas), dependiendo de sus características y naturaleza reaccionan de forma distinta ante el flujo de energía incidente. Una parte de este flujo es absorbido por los objetos, otra es transmitida a los objetos vecinos y, finalmente, otra parte del flujo es reflejada.

Esta energía reflejada es captada por el sensor (tercer componente) y codificada digitalmente en un rango cuyos valores dependen de la resolución radiométrica del sensor (256 niveles-ETM-Landsat-, 1.024 niveles -AVHRR-NOAA-, 2.048 niveles -IKONOS, QuickBird- y hasta 65.536 valores en algunos sensores, como MODIS y los radares de ERS y Radarsat). Si los cuerpos absorben o transmiten mucha energía y reflejan poca, los valores registrados por el sensor serán bajos. Es el caso de las masas de agua en algunas regiones espectrales del visible (verde y rojo) y del infrarrojo cercano y medio. Por el contrario, si los cuerpos son muy reflectivos el sensor registrará valores elevados. Es el caso de las masas vegetales en el infrarrojo cercano, de los mantos nivales o de los suelos descubiertos, de origen calizo, en la región espectral del visible.

En ocasiones, la propia energía emitida por los objetos de la superficie terrestre es captada por el sensor, especialmente en algunas regiones del espectro electromagnético como el infrarrojo térmico. En la misma línea, algunos sistemas activos de Teledetección, como el radar, no dependen de una fuente de energía externa, como la solar, pues emiten un haz incidente cuya señal registran, más tarde, cuando ésta es reflejada.

Los datos digitales almacenados a bordo del satélite son enviados, periodicamente, a las estaciones receptoras (cuarto componente), distribuidas convenientemente en la superficie terrestre. Allí se graban los datos y, tras diversos procesos, las imágenes son distribuidas a los usuarios mediante diferentes políticas y canales de comercialización.

Las imágenes son tratadas visual o digitalmente, mediante programas informáticos de tratamiento digital, por el intérprete (quinto componente) para derivar cartografía temática y otros productos (variables biofísicas tales como humedad del suelo o de la vegetación, temperatura de superficie terrestre y marina o salinidad entre otras) que pueden ser integrados con otra información geográfica.

Finalmente, el usuario final (último componente) es el que recibe la información derivada de las imágenes, con objeto de tomar decisiones en materias diversas como la planificación del territorio, la ordenación de los recursos naturales, la conservación de la diversidad biológica o la prevención y lucha contra incendios forestales.

La energía reflejada por las cubiertas terrestres y captada por el sensor difiere en función de la región espectral (banda) a la que éste sea sensible. Esto permite realizar composiciones en color, combinando tres bandas, a las cuales se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo (figura 5).

Así pues, para crear una composición en color se requiere seleccionar tres bandas de una imagen y asignar a cada una de ellas un color primario (azul, verde o rojo). En la figura 6 se han seleccionado las bandas 2 (región espectral del verde, de 0,52 a 0,60 µm), 3 (región espectral del

rojo, de 0,63 a 0,69 µm) y 4 (infrarrojo cercano, de 0,76 a 0,90 µm) de una imagen sobre Madrid, captada el 2 de agosto de 1984 por el sensor Thematic Mapper de Landsat-5. A cada una de ellas se le ha asignado un color primario: a la banda 2 (arriba a la izquierda en la figura 6) el color azul, a la banda 3 (arriba en el centro) el verde y a la banda del infrarrojo próximo o cercano (a la derecha) el rojo. El resultado de la composición se observa en la parte inferior. En este caso, se trata de una composición en falso color convencional, frecuentemente empleada en el análisis visual o fotointerpretación de imágenes de satélite y de fotografías aéreas.

Como podrá apreciar el lector, se llama así porque el color resultante es diferente al que el ojo humano percibe. Así por ejemplo, la vegetación natural se observa en color rojo. Veánse el Parque del Retiro, en el centro de la imagen inferior o los campos de golf de Puerta de Hierro, en el cuadrante noroeste de la imagen. En rojo menos intenso (de rojo oscuro a pardo) se observan las masas forestales perennifolias (pinares y encinares) de la Casa de Campo, en el sector occidental de la imagen. El color rojo se debe a que la vegetación sana, debido a la estructura celular de las hojas y a los pigmentos contenidos, es muy reflectiva en el infrarrojo cercano y absorbe gran parte del flujo incidente en las bandas del visible, especialmente en el verde.

A pesar del interés de esta combinación de color por parte de los expertos, ya que estas bandas aportan un gran volumen de información no redundante y guardan escasa correlación entre sí, a los lectores sin entrenamiento previo les cuesta interpretar adecuadamente este tipo de imágenes. Para adquirir este entrenamiento, conviene adjuntar claves

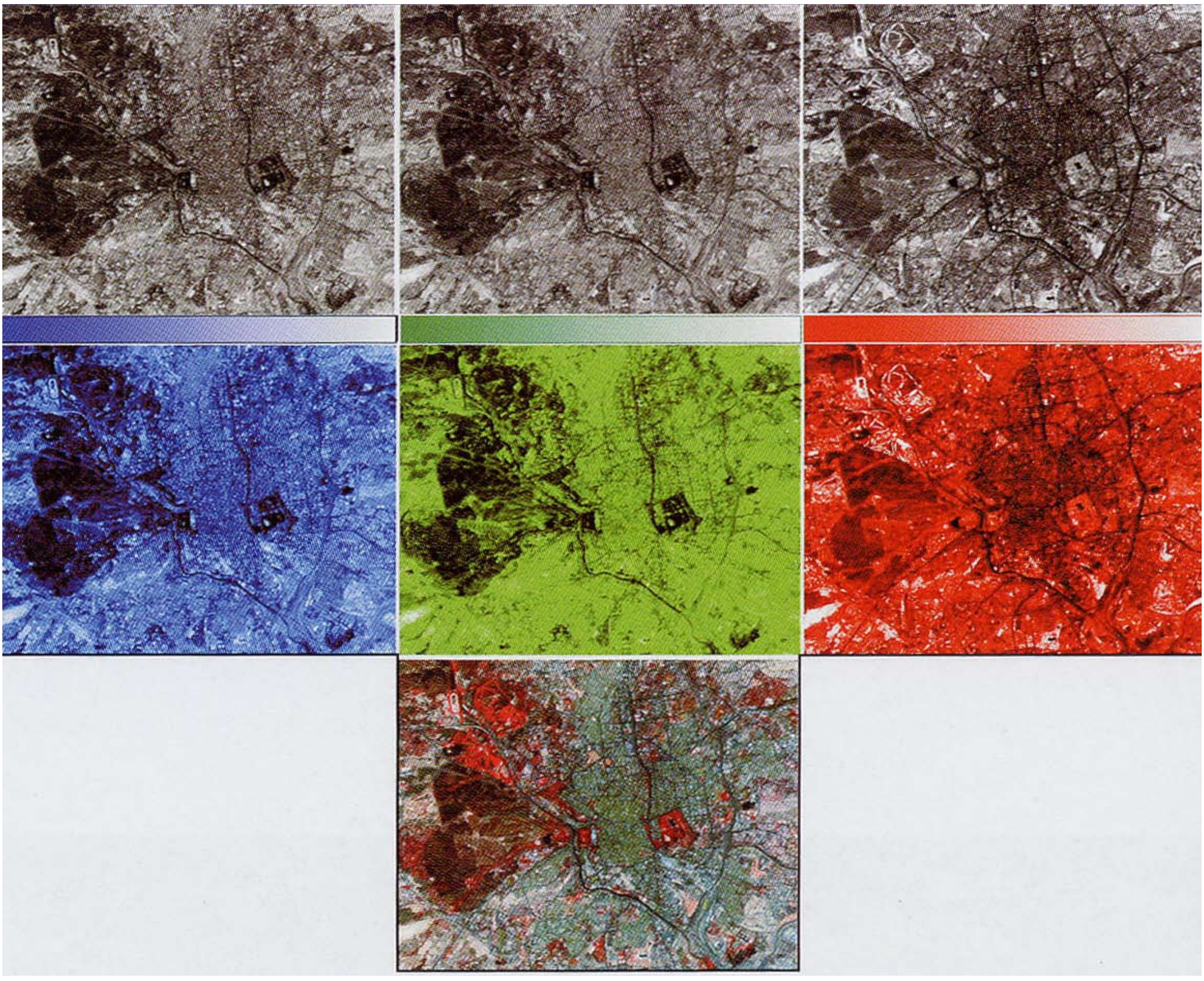


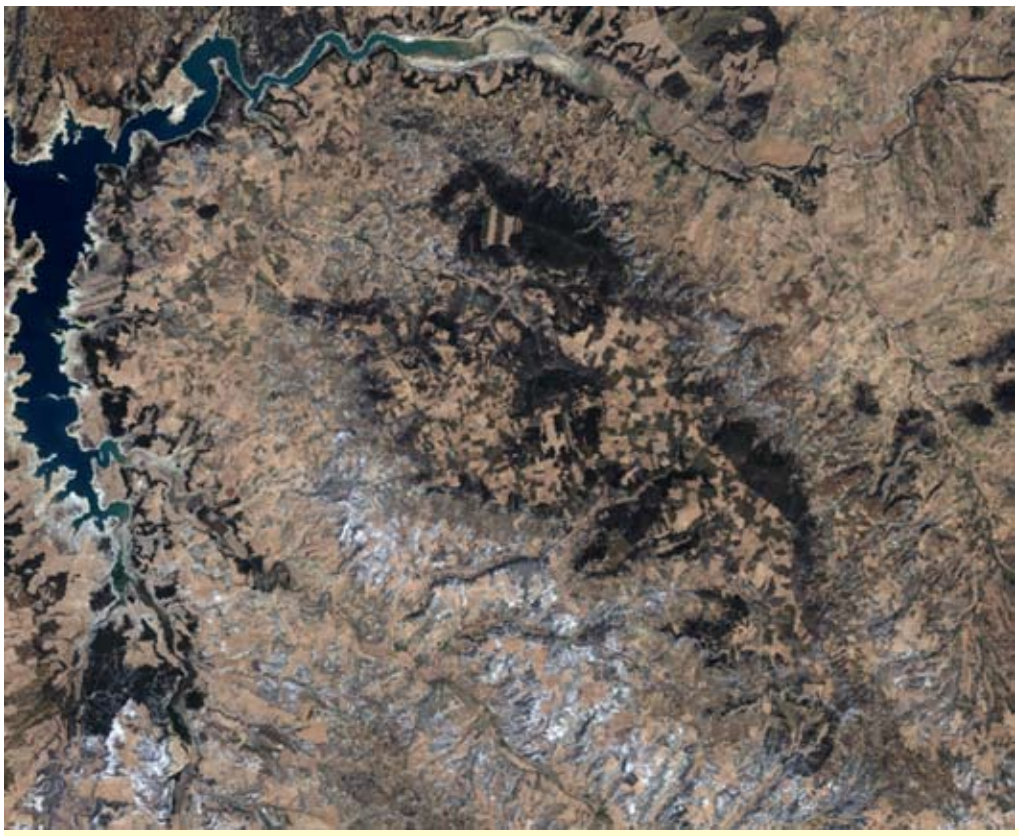
Figura 6: Proceso de formación de las composiciones en color. Tomado de Chuvieco, 2008

gráficas y mixtas para establecer correspondencias entre los objetos reales y su apariencia en la imagen en falso color. En función del orden de asignación de los colores primarios y de las bandas elegidas resultan imágenes compuestas, realizadas con distintas combinaciones de color. Normalmente, suelen designarse con el número de las bandas, del sensor del que se trate, que entran en la composición, en el orden de asignación de los colores primarios RGB (del inglés *Red, Green, Blue*).

Las más frecuentes en fotografía aérea son las composiciones en color natural. Con imágenes espaciales no es tan frecuente porque pocos sensores incluyen un canal sensible al azul. Los sensores TM y ETM del programa Landsat sí permiten construir este tipo de combinaciones. En la figura 7, a cada banda del espectro visible -azul (banda 1 del sensor ETM, en este caso), verde (banda 2) y rojo (banda 3)- se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo, en el mismo orden). También se la conoce como composición ETM321 (RGB).

En Teledetección espacial, tal vez la combinación más frecuente es la conocida como falso color convencional. Una buena parte de los sensores de los satélites de observación de la Tierra relacionados con los recursos naturales disponen de canales sensibles a una parte del espectro visible y del infrarrojo próximo (Landsat-MSS, SPOT-HRV, IRS-LISS, DMC). En la figura 8, se eligen tres bandas, una del infrarrojo cercano (banda 4, en el caso del sensor ETM), a la que se le asigna el color rojo, y otras dos del visible -rojo (banda 3) y verde (banda 2)- a las que se les asignan los colores primarios verde y azul, respectivamente (ETM432, RGB).

Una variante de esta última composición coloreada es la denominada falso color mejorado. En este caso, se sustituye un canal del visible por el infrarrojo medio, que aporta información sobre las variaciones de humedad. En la figura 9 se muestra un ejemplo, combinando las bandas 453 del sensor ETM de Landsat-7. Esta es la composición utilizada en



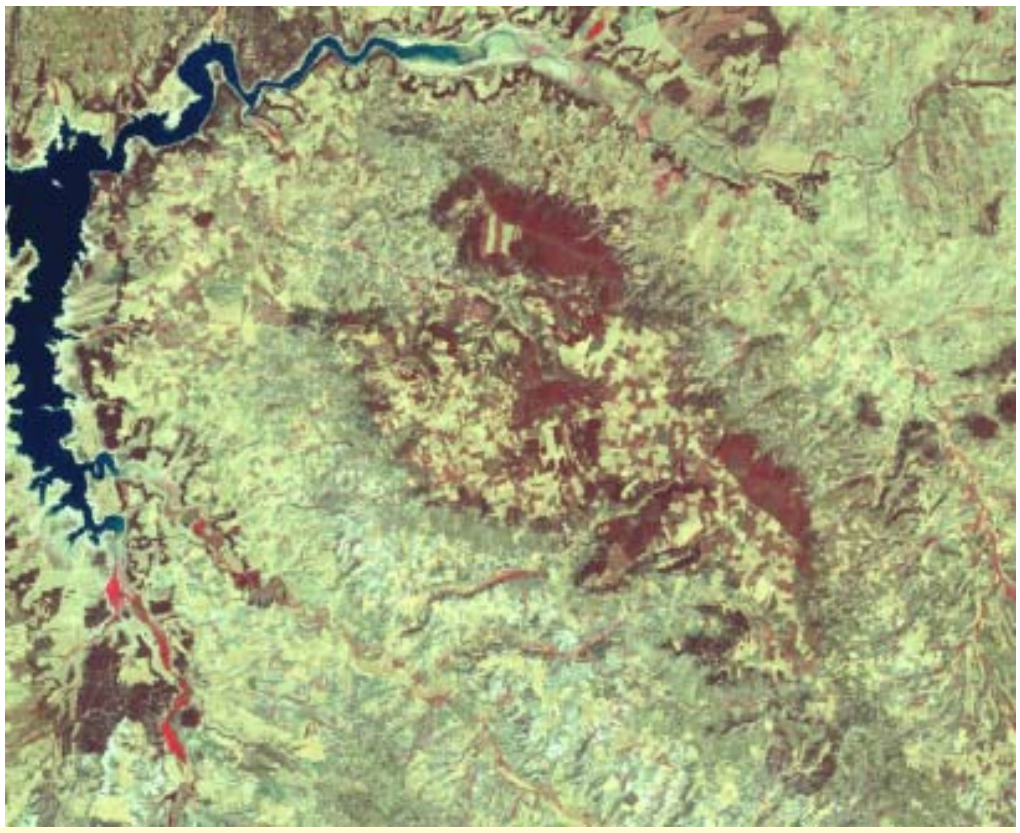


Figura 7 (izquierda): Composición en color natural ETM321 de una imagen Landsat-7 ETM, tomada sobre el Embalse de Buendía y La Alcarria Conquense, el día 5 de agosto de 2002. Figura 8 (derecha): Composición en falso color convencional ETM432 de la misma imagen.

CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

Según algunos autores (Strandberg, 1975; Short, 1982; Campbell, 1987), las claves de identificación son herramientas que ayudan al intérprete a identificar e interpretar información, de manera organizada y consistente. Según su formato, las claves de identificación pueden ser gráficas o textuales y según su nivel se distingue entre las técnicas y no técnicas.

Las claves gráficas de identificación son útiles de primera magnitud y proporcionan un amplio cuerpo de experiencias indirectas a los intérpretes noveles.

En esta lámina se muestran las claves gráficas de una serie de cubiertas de ocupación del suelo básicas. Como puede observar el lector, algunas cubiertas apenas cambian el color con el que son representadas en las distintas combinaciones de color. Sin embargo, los colores con los que son representadas las masas forestales de especies perennifolias (encinares y pinares) y, especialmente, los cultivos en regadío varían sustancialmente, del rojo al verde intenso, en los ejemplos mostrados, como consecuencia del color asignado a la banda del infrarrojo próximo, canal en el que es máxima la reflectividad de esta cubierta. Las masas acuáticas (embalse de Buendía) son poco reflectivas en todas las bandas, por eso se muestra en color negro. Tan sólo aparece de color azul oscuro en la composición en color natural.

CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

CLAVES GRÁFICAS

- Agua
- Suelo desnudo
- Olivares
- Cultivos de regadío
- Perennifolias

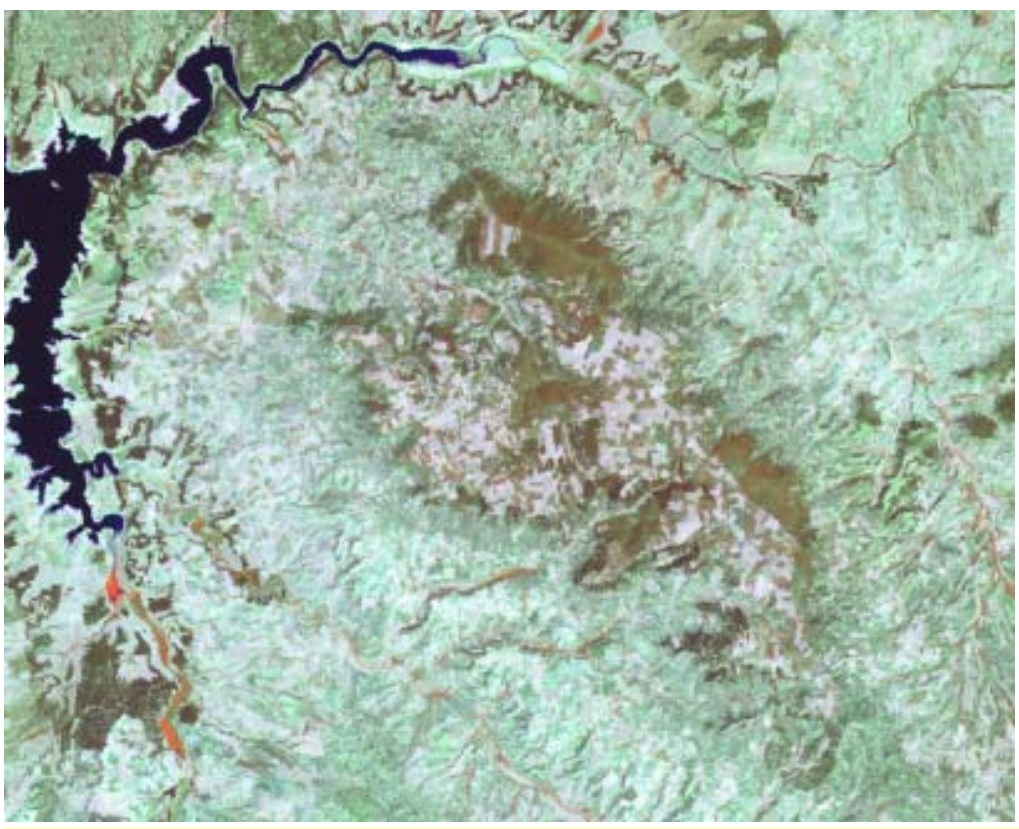




Figura 9 (izquierda): Composición en falso color mejorado ETM453 de la misma escena referenciada en las figuras anteriores. Figura 10 (derecha): Composición en pseudo color natural ETM543 de la misma imagen Landsat.

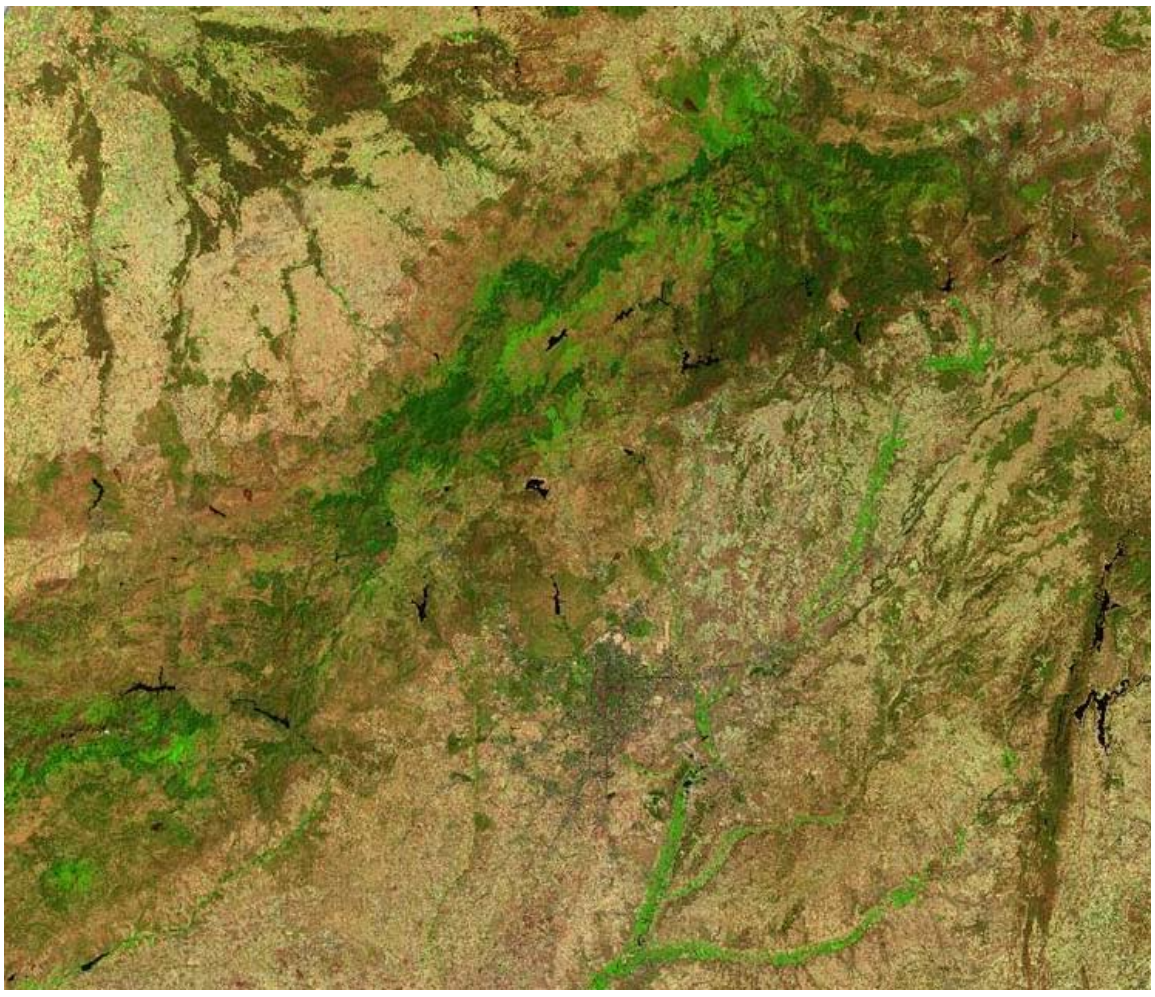
el análisis de imágenes Landsat para el proyecto CORINE-Land Cover, cuyo objetivo es la cartografía de la ocupación del suelo de todos los países miembros de la Unión Europea, a escala 1:100.000.

Cuando se pretende acercar las imágenes de satélite al gran público, las agencias cartográficas suelen emplear una composición en pseudo-color natural. La figura 10 muestra un ejemplo. Las bandas elegidas pueden ser las mismas que las utilizadas en el falso color mejorado pero se asignan los colores primarios en un orden diferente. En este caso, al infrarrojo cercano se le asigna el color verde, en vez del rojo. En este ejemplo, el resultado es la composición ETM543 (RGB). Como puede apreciarse, las masas forestales se observan en un color verde, más familiar para el observador. Por ese motivo, el Instituto Geográfico Nacional ha elegido esta combinación para reproducir la serie de cartoimágenes de España, a distintas escalas (1:100.000 y 1:250.000).

Obviamente, las claves gráficas de color, que habitualmente auxilian a los lectores de las imágenes y a los fotointérpretes noveles, varían en función de la combinación de color empleada. Junto a las figuras 7 a 10, se muestran las claves gráficas de color, correspondientes a cada una de ellas, con objeto de ilustrar cómo algunas clases temáticas apenas sufren variaciones de color (suelos desnudos, agua) mientras que otras (vegetación sana vigorosa) experimentan cambios muy significativos. Un adecuado entrenamiento previo es aconsejable para aquellos que quieran extraer valiosa información espacial de las imágenes de satélite en sus variadas aplicaciones temáticas.

Con los sensores actuales, que recogen información en un gran número de bandas espectrales, las combinaciones para formar imágenes compuestas en color son múltiples. Por ejemplo, el sensor hiperespectral MODIS dispone de 29 bandas en distintas regiones espectrales, con la misma resolución espacial de 1.000 m. Con esta información podrían formarse tantas combinaciones de color como 29 elementos (bandas) tomados de 3 en 3 (colores primarios), es decir 3.654 combinaciones. Con los sensores TM y ETM de Landsat, si consideramos las 6 bandas de similar resolución espacial de 30 m., se podrían realizar 20 combinaciones distintas. Además, podría ampliarse el número de composiciones si se mezclan bandas de distintas resoluciones espaciales y de distintos sensores mediante técnicas de fusión de imágenes.

A pesar de que cada aplicación temática tiene características específicas, los especialistas en el tema, tras realizar estudios empíricos y estadísticos, concluyen que las mejores combinaciones son aquellas que registran datos en el infrarrojo medio, cercano y en un canal del visible o en el infrarrojo cercano y dos canales del visible. Estas son las bandas que menos correlación presentan, entre sí.



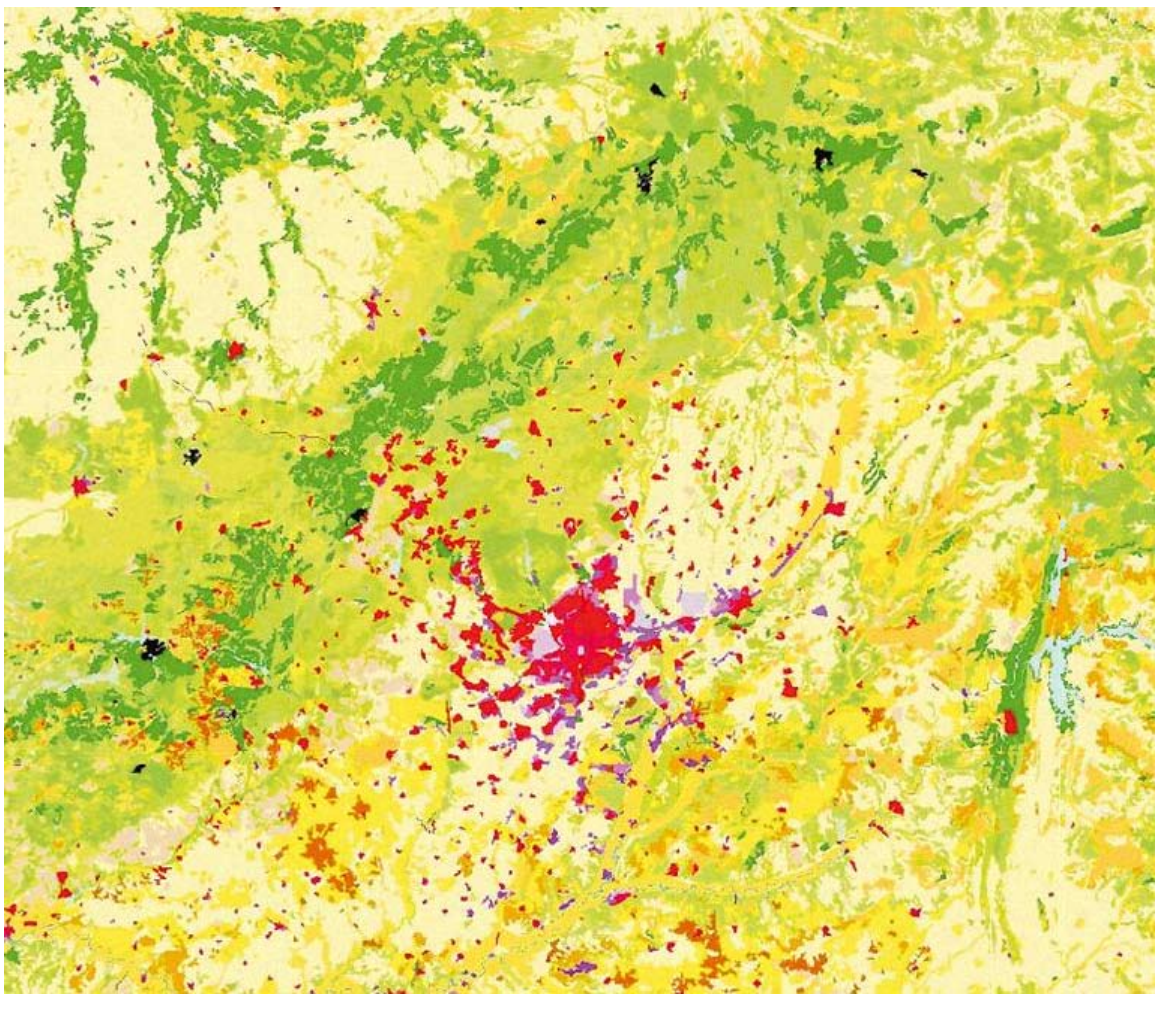


Figura 11 (izquierda): Fragmento del mosaico, en pseudo-color natural (ETM543), de ortoimágenes Landsat 7, utilizadas por el Instituto Geográfico Nacional para el proyecto europeo CORINE-Land Cover. Se observa la zona de la Comunidad de Madrid y una porción de la tierra de pinares de Segovia, en la esquina noroeste de la imagen.

Figura 12 (abajo): Fragmento del mapa de ocupación del suelo de España, a escala 1:100.000 y 3 niveles, del proyecto CORINE-Land Cover. El mapa ha sido derivado de la imagen superior mediante análisis visual y apoyo de técnicas de tratamiento digital de la imagen
Fuente: http://www.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html



4. TELEDETECCIÓN: HERRAMIENTA DE INFORMACIÓN ESPACIAL

La Teledetección espacial dispone de una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas convencionales de observación de la Tierra como la fotografía aérea o la observación directa, a través de trabajos de campo. Entre las principales ventajas, se resaltan las siguientes: (i) visión global, (ii) observación de información en regiones no visibles del espectro, (iii) observación a distintas escalas, (iv) frecuencia y (v) homogeneidad en la adquisición.

Gracias a estas aptitudes, la Teledetección espacial se convierte en una herramienta de información espacial de gran interés para la producción y actualización cartográfica, como fuente de entrada en Sistemas de Información Geográfica de carácter multipropósito, para los estudios ambientales y para las Ciencias de la Tierra, en general.

4.1. VISIÓN GLOBAL

Tanto los satélites geoestacionarios como los que describen una órbita heliosíncrona tienen la capacidad de aportar imágenes globales de la Tierra. Los primeros, gracias a su posición elevada y a su amplio campo de observación, captan imágenes del disco completo de la Tierra en un solo registro. Los segundos permiten construir mosaicos de imágenes que cubren el planisferio completo.

En ambos casos, las imágenes aportan una visión global de la Tierra, inédita hasta hace pocas décadas. Como se decía en el apartado 2, los satélites permiten cumplir la intuición de Sócrates de que era necesario elevarse más allá de la atmósfera para disponer de una visión global y comprender mejor los procesos que se desencadenan en la Tierra.

En la figura 13 se observa, claramente, la distribución geográfica de las masas nubosas. Gracias a la repetitividad de las imágenes registradas por los satélites y de las animaciones realizadas con ellas, puede

Figura 13: Compuesto de imágenes, en color natural. Vista del sector euroasiático-africano del hemisferio Norte. Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BlueMarble/BlueMarble_history.php



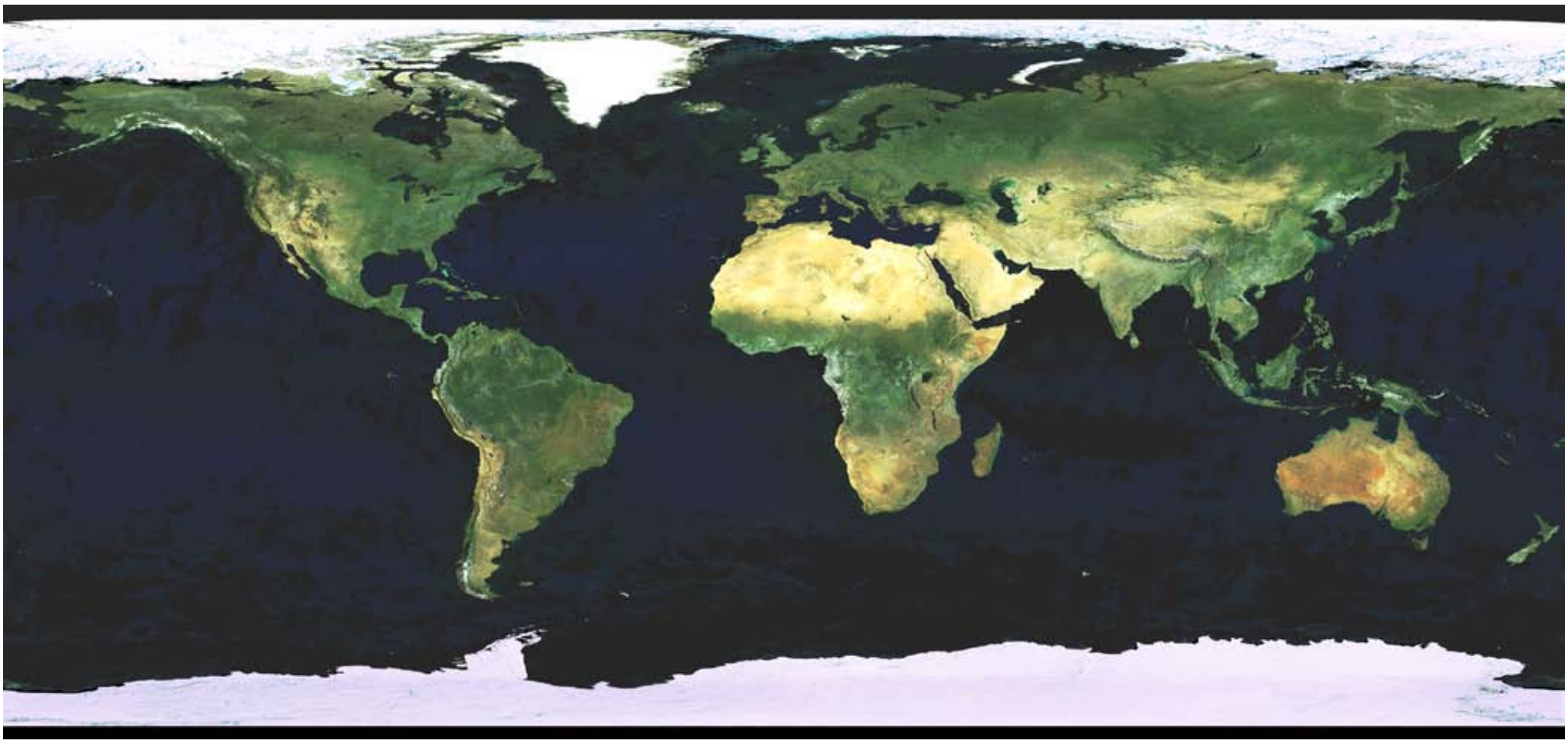


Figura 14: Mosaico de imágenes captadas, entre mayo y noviembre de 2004, por el sensor MERIS, a bordo del satélite europeo ENVISAT. Fuente: http://www.esa.int/esaCP/SEMF2ZY5D8E_Spain_1.html

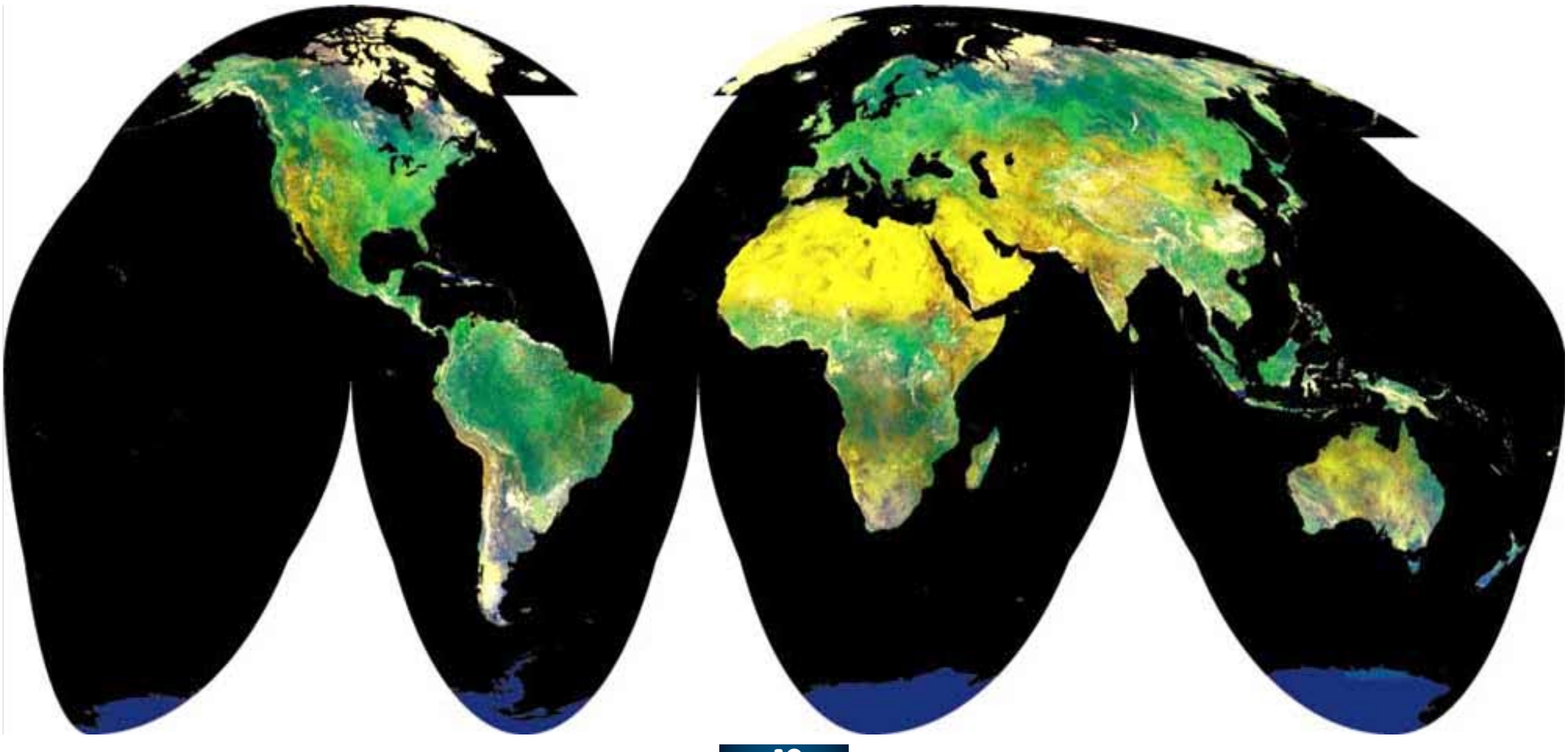
hacerse un seguimiento, casi en tiempo real, de las masas nubosas y comprender mejor los modelos generales de circulación atmosférica. En la visión estática de la figura 13, se aprecia la compacidad de las masas nubosas en las latitudes medias del hemisferio norte, intuyendo el lector los vientos dominantes del oeste en esa franja latitudinal. Igualmente, se aprecia la presencia permanente de las masas nubosas que cubren la zona ecuatorial.

En las figuras 14 y 15 se observan dos mosaicos de imágenes que cubren todo el planisferio, compuestos con imágenes de dos satélites distintos, Envisat, en el primer caso, y NOAA, en el segundo. En ambos casos, el lector puede percibir la distribución geográfica de los principales ecosistemas terrestres y apreciar la influencia que los factores zonales y azonales imponen a esta distribución. Pueden apreciarse las grandes extensiones de la pluvisilva y de los bosques tropicales en torno al Ecuador y en las zonas intertropicales de África, de la Amazonía, de América del Sur, y de Indonesia y de otras áreas del sureste asiático. Frente a estos ecosistemas, se encuentran los grandes desiertos del planeta, los del Sahara y Kalahari, al norte y sur de África, respectivamente, los situados en la península arábiga, los del centro y sur de Asia, los grandes desiertos australianos y los situados en las fachadas occidentales de América (California, Mohave, Atacama), motivados por la presencia de las corrientes frías de California y de Humboldt.

En las latitudes septentrionales del hemisferio norte, se observa la extensión de la taigá y de los bosques boreales de Europa y Rusia, en el continente euroasiático, y de Canadá, en América del Norte. En la Península Ibérica, se aprecia el contraste entre la zona septentrional, cubierta por los bosques húmedos atlántico-cantábricos, y la zona centromeridional, dominada por cultivos y por superficies forestales propias del monte mediterráneo, adaptadas al estrés hídrico del verano.

En los años 90, el IGBP (*International Geosphere & Biosphere Program*) desarrolló una cobertura global de ocupación del suelo basada en imágenes de satélite, denominada IGBP-Land Cover (Brown *et al*., 1993; Townshend *et al*., 1991). Recientemente, se han realizado otras coberturas globales, como MODIS Land Cover, y europeas (CORINE).

Figura 15: Mosaico de imágenes captadas desde el satélite NOAA-AVHRR en una proyección homolosena de Goode. Fuente: http://landcover.usgs.gov/glcc/index.php



4.2. INFORMACIÓN SOBRE REGIONES NO VISIBLES DEL ESPECTRO

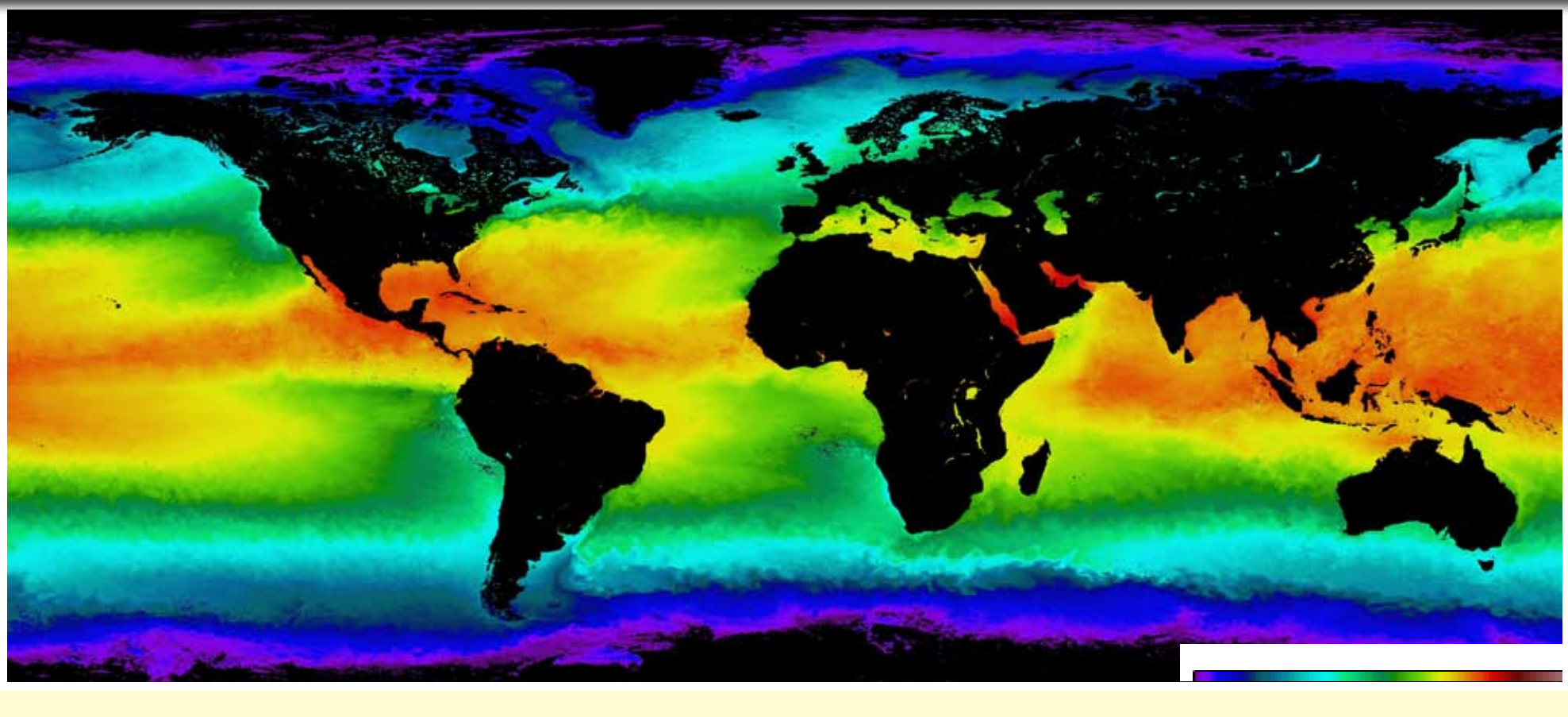


Figura 16: Mapa de temperaturas medias mensuales de la superficie marina a partir de un compuesto de imágenes AQUA-MODIS captadas entre el 1 de septiembre y el 1 de octubre de 2009.
Fuente: http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/Search.html?group=10

Gracias a su resolución espectral, la mayoría de los sensores que viajan a bordo de los satélites registran información tanto del espectro visible como del espectro no visible. Ésta es una de las grandes ventajas de la Teledetección frente a otros sistemas de observación de la Tierra como la fotografía aérea y la observación directa. En regiones no visibles del espectro es posible diferenciar objetos cuya respuesta espectral es similar en el rango del visible y estimar determinadas variables biofísicas.

Así por ejemplo, en la figura 16 se han determinado las temperaturas medias de la superficie de los mares y océanos del planeta a partir de un conjunto de imágenes MODIS, gracias a su capacidad de registrar la energía emitida en la región del infrarrojo térmico. La distribución espacial de esta variable es muy elocuente. Se evidencia un gradiente térmico zonal entre las cálidas aguas ecuatoriales y las gélidas aguas polares. Asimismo, se aprecian los factores azonales que distorsionan este esquema latitudinal. Se observa la distribución de la corriente cálida del Golfo de México (*Gulf stream*) y su deriva nordatlántica que influye en la suavización del clima de Noruega y parte de Suecia. En el sentido contrario, también pueden identificarse, en colores azules, las corrientes frías de las fachadas occidentales de América (California y Humboldt), de África (Canarias y Namibia). A nivel regional, esta variable tiene gran influencia en la formación de huracanes y tifones en el Atlántico y Pacífico. Las anomalías térmicas del Pacífico, relacionadas con el fenómeno del Niño, ocasionan cambios bruscos de temperaturas y de precipitaciones a nivel global.

En la figura 17, se observa nítidamente la zona afectada por un incendio forestal (mancha oscura del centro de la imagen), gracias al registro de información en bandas del espectro visible y de la región del infrarrojo cercano. La vegetación quemada modifica su comportamiento frente a la vegetación sana (figura 18). La primera (a la izquierda), como consecuencia de la pérdida de los pigmentos y de la destrucción de la estructura celular de las hojas, refleja más luz visible y menos luz en el infrarrojo que la vegetación sana (a la derecha). Composiciones en color que emplean las bandas del visible, infrarrojo cercano y del infrarrojo medio, sensible al contenido de humedad, son las más utilizadas por los expertos para llevar a cabo, cada año, la cartografía de las áreas quemadas tras la finalización de la temporada de riesgo.

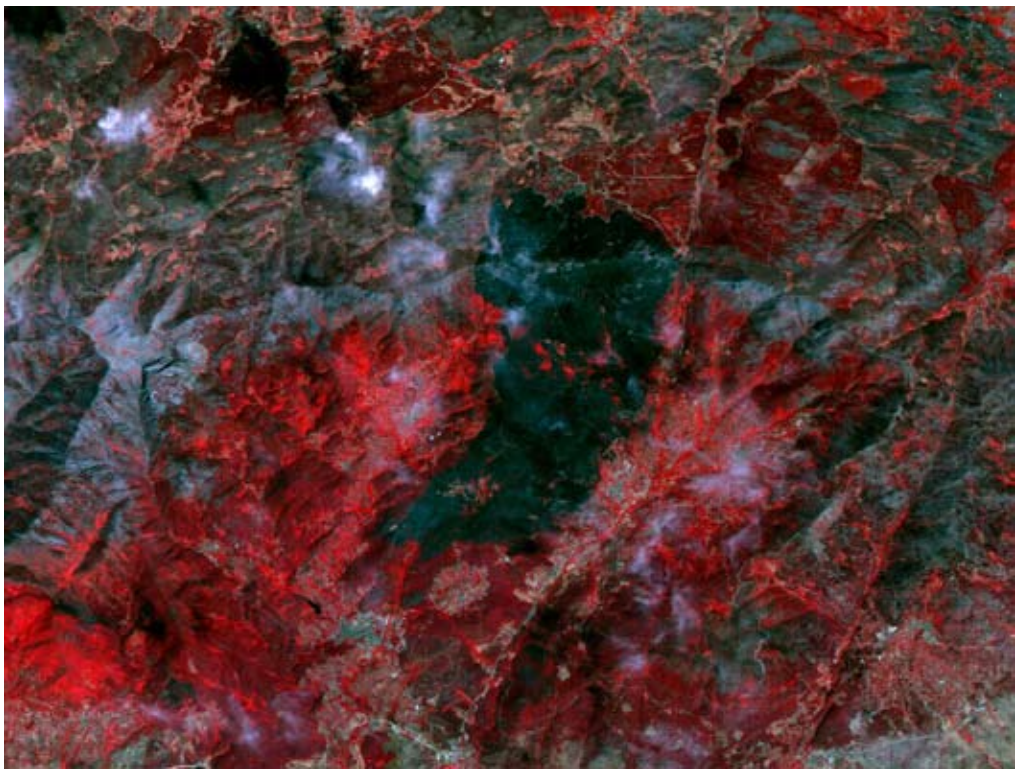


Figura 17: Imagen en falso color convencional captada por el satélite español Deimos-1 sobre la Sierra de Gredos. En el centro de la imagen, en color oscuro, se percibe la zona afectada por el incendio de Arenas de San Pedro que se inició el día 28 de julio de 2009 y afectó a una superficie de 5.000 ha y un perímetro de 40 km.
Fuente: http://www.deimos-imaging.com/imagenes-deimos-1

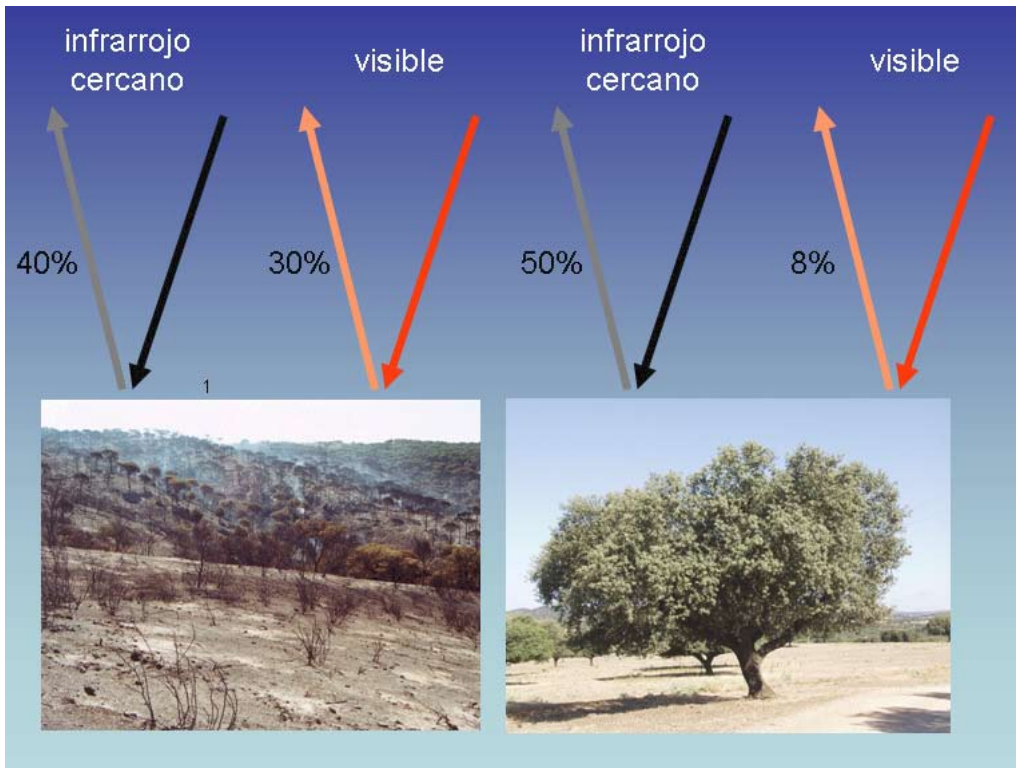


Figura 18: Variación del comportamiento espectral de la vegetación quemada (izquierda) frente a la vegetación sana (derecha) en las regiones del visible y del infrarrojo cercano (Adaptado de Simmon, 2009).

4.3. OBSERVACIÓN A DISTINTAS ESCALAS

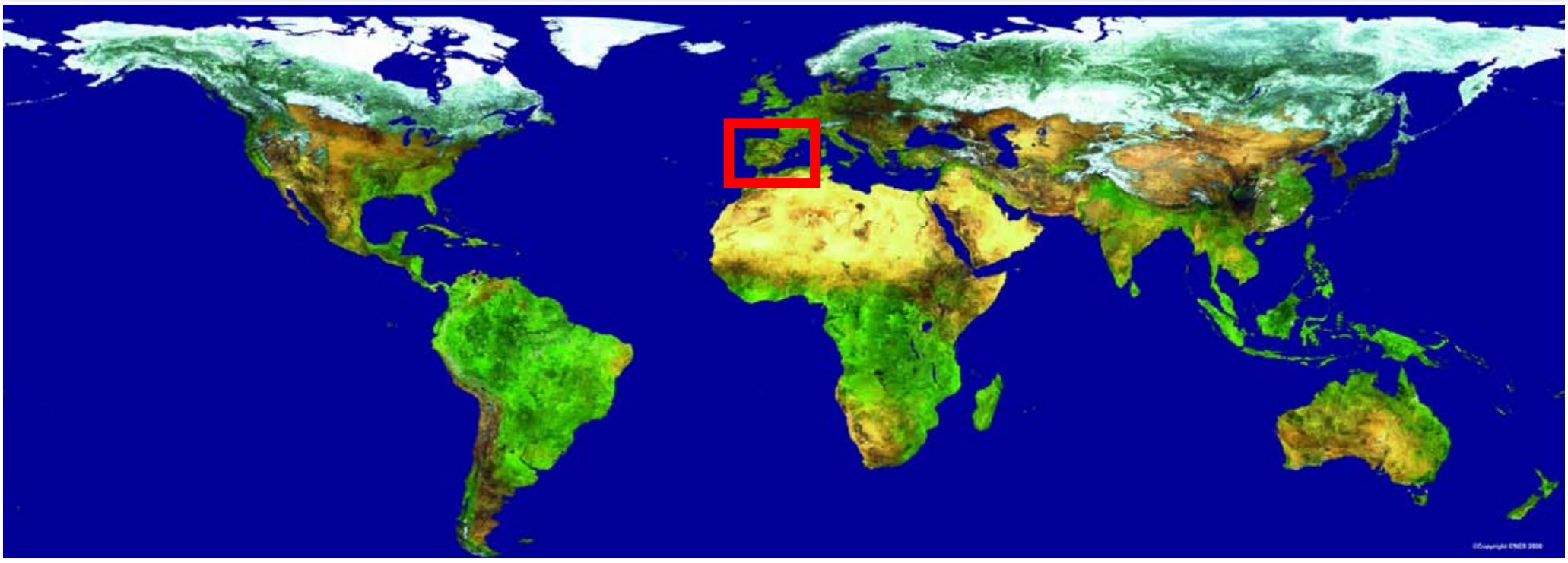
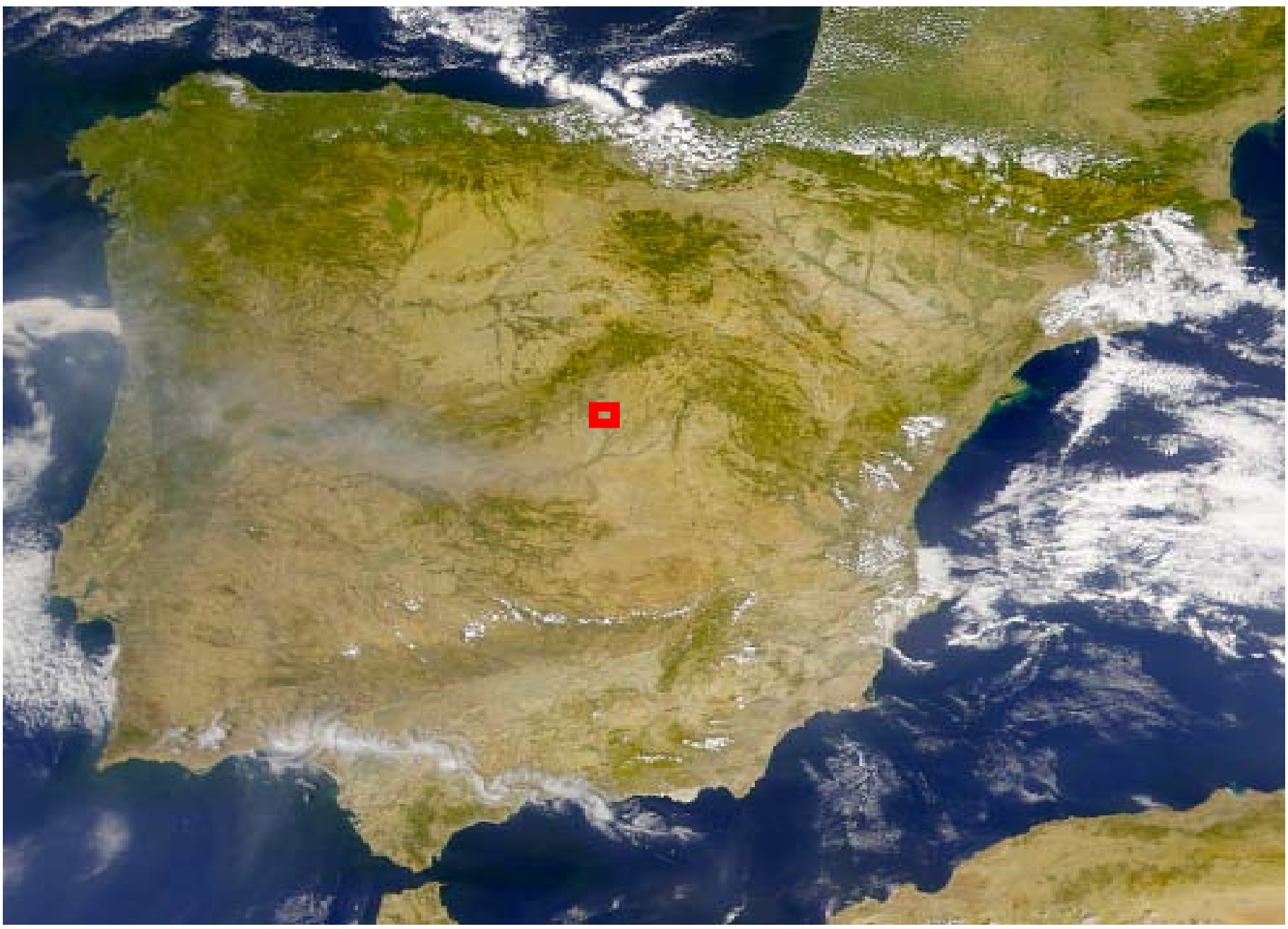
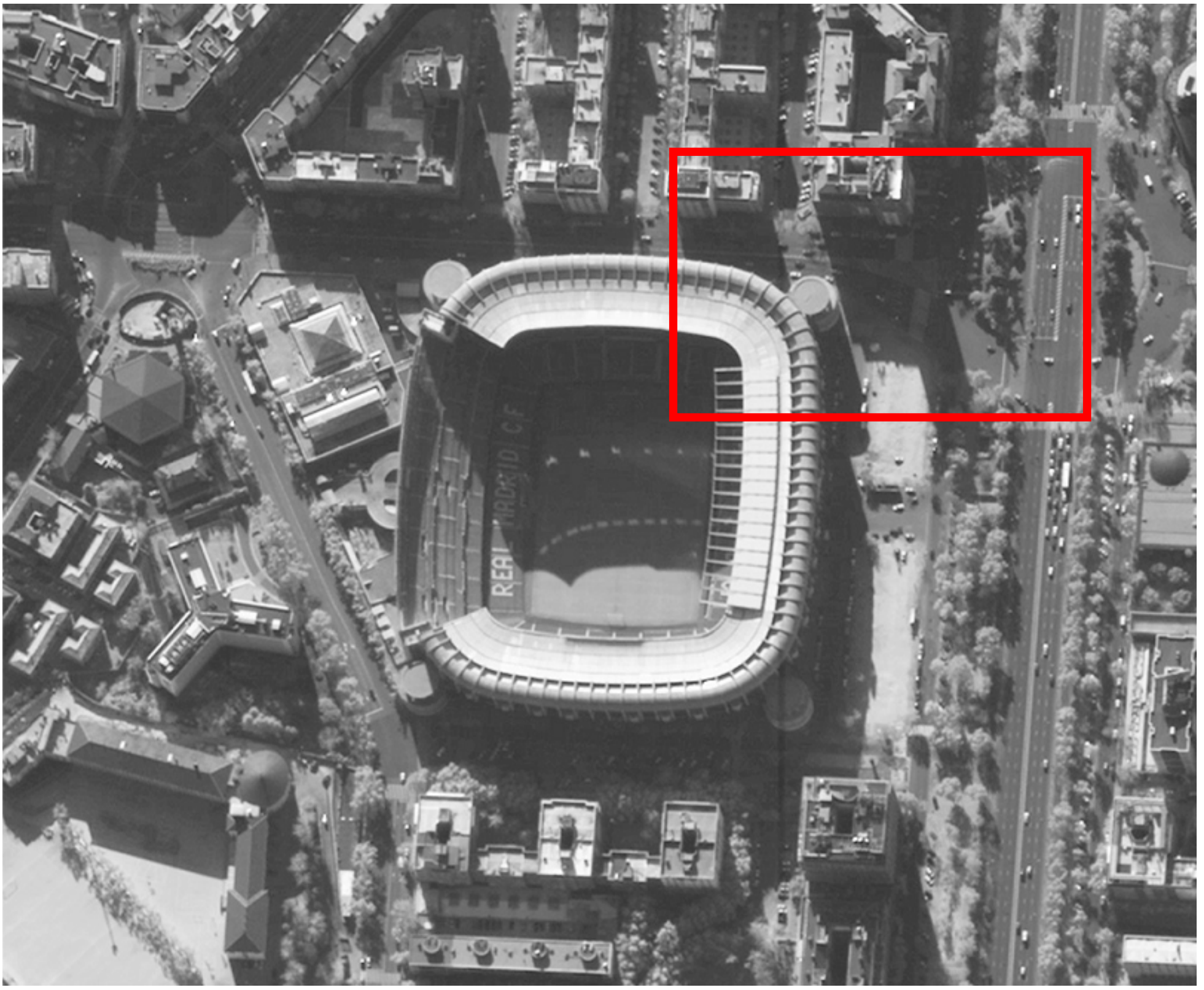


Figura 19: Mosaico de imágenes captadas, entre el 21 y el 31 de marzo de 1999, por el sensor VEGETATION, a bordo del satélite francés SPOT. Se selecciona el valor máximo de NDVI del periodo analizado.
Fuente: http://www.spot-vegetation.com/vegetationprogramme/index.htm

Gracias a las distintas órbitas que describen los satélites, a las diversas alturas a las que orbitan y a sus diferentes campos de visión y resolución espacial, las imágenes captadas permiten realizar análisis de la superficie terrestre a distintas escalas y con distintos niveles de detalle. Desde la escala local hasta la global es posible realizar investigaciones multiescalares. En la figura 19 se observa un mosaico de imágenes tomadas por el sensor Vegetation del satélite francés SPOT con una resolución espacial de 1 km^2, siendo posible una observación global de la distribución de los ecosistemas terrestres en función de un índice de vegetación calculado por combinación de dos bandas de la imagen. Se aprecian, con mayor verdor, los bosques ecuatoriales, tropicales y templados junto a las extensas praderas de distintas latitudes. En amarillo, se representan los ecosistemas desérticos y subdesérticos junto a zonas esteparias de los interiores de los continentes; es decir, las zonas que registran valores más bajos del índice de vegetación. Si centramos nuestra atención en la Península Ibérica podemos observarla con mayor

Figura 20: Imagen SeaWIFS de España, captada el 10 de septiembre de 2001.
Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center y ORBIMAGE.





Figuras 21 (arriba): Imagen QuickBird de 2001, sobre el estadio de fútbol Santiago Bernabeu y sobre el distrito madrileño de Chamartín. Fuente: www.digitalglobe.com

detalle (figura 20) gracias a otros sensores, como el SeaWIFS, diseñado originalmente para estudiar el color de los oceános. En esta imagen se perciben claramente las grandes unidades morfoestructurales de la Península, desde el macizo galaico hasta las depresiones del Ebro y del Guadalquivir junto a las dos mesetas y a los principales sistemas montañosos. Otros accidentes geográficos son claramente discernibles, como el Estrecho de Gibraltar, la costa gallega, recortada por las rías, y el delta del Ebro, rodeado por una orla de color azul verdoso que se corresponde con los sedimentos aportados al mar por el río.

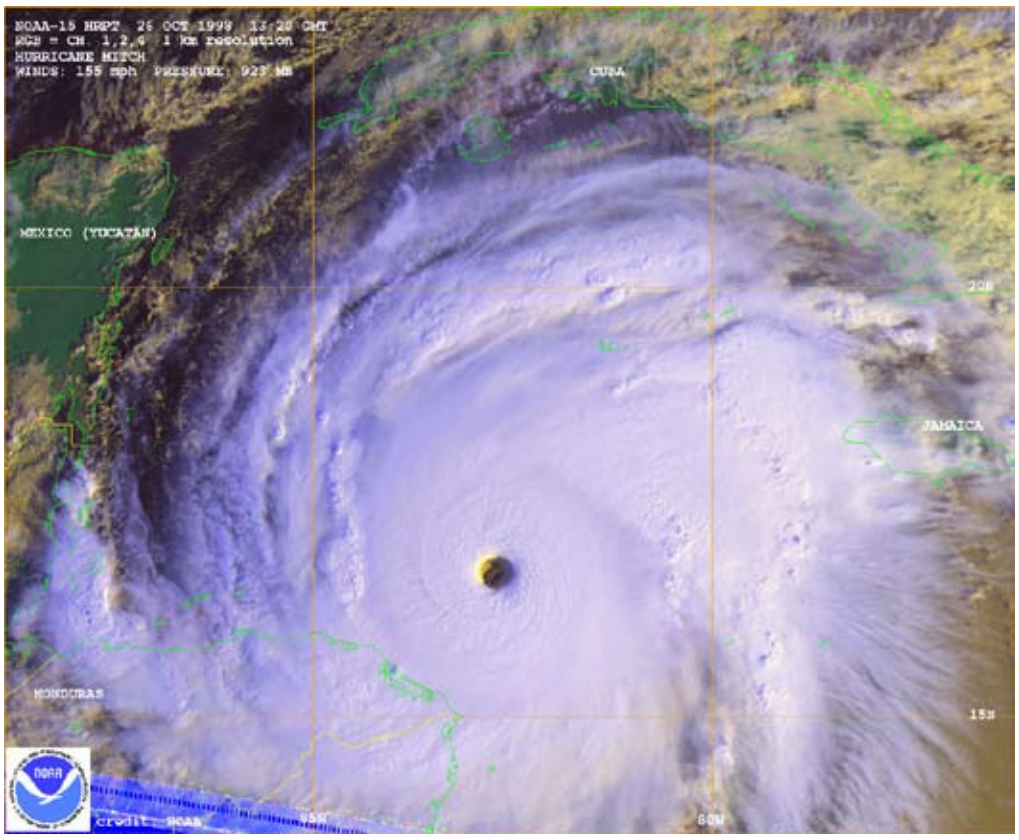
Si se realiza un zoom figurado sobre el centro de la Península, podríamos observar una zona urbana de la ciudad de Madrid con mucho más detalle, gracias a la muy alta resolución espacial de satélites comerciales como QuickBird, que ofrecen una resolución espacial de hasta 61 cm. en terreno, en modo pancromático. En la figura 21, se observa una imagen del distrito de Chamartín y del estadio Santiago Bernabeu. Pueden apreciarse, con detalle, los vehículos y las copas de los árboles. Este tipo de imágenes son similares a las fotografías aéreas e, igualmente, pueden utilizarse para estudios de morfología urbana, para el cálculo de las alturas de los edificios y de las densidades de las manzanas y barrios y facilitan información sobre los equipamientos y servicios de la ciudad.

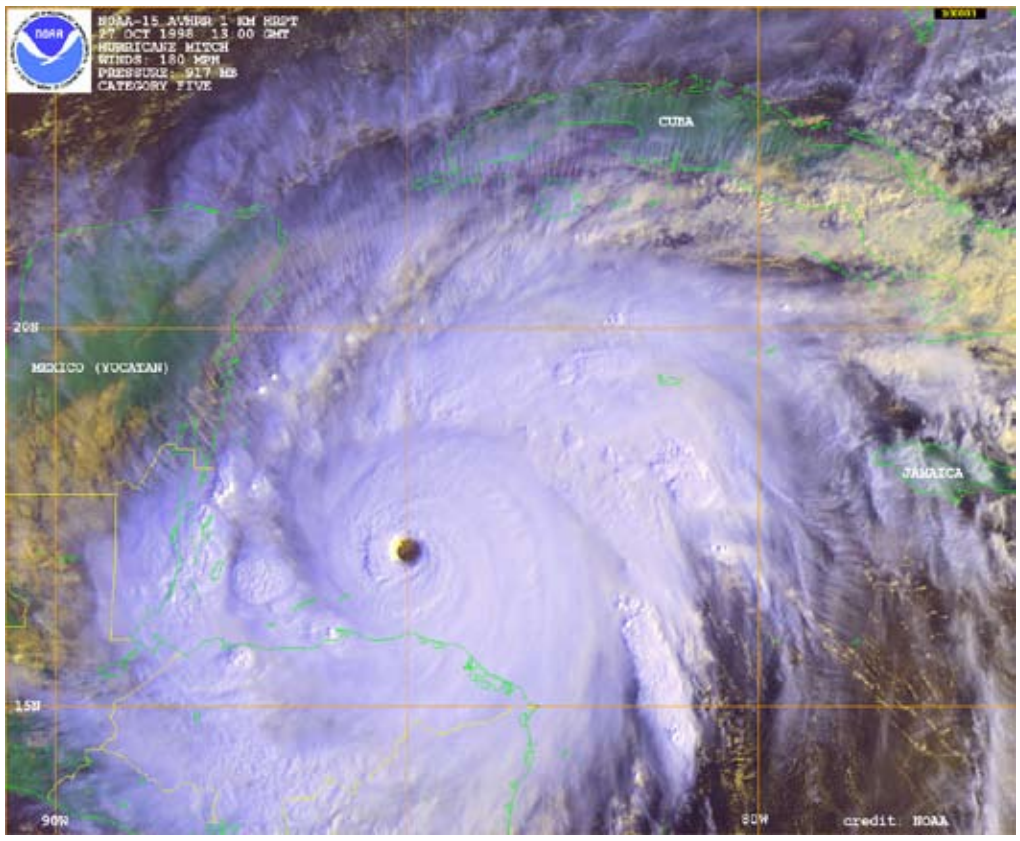
En resumen, desde las órbitas geoestacionarias, situadas a 36.000 km, hasta las órbitas polares, más próximas a la Tierra, las variadas plataformas de Teledetección son capaces de proporcionar imágenes globales o de muy alta resolución espacial para abordar, con éxito, estudios multiescalares de la superficie terrestre con objetivos multipropósito y centrados en temas y variables muy diferentes. Esta capacidad es muy apreciada por los usuarios.

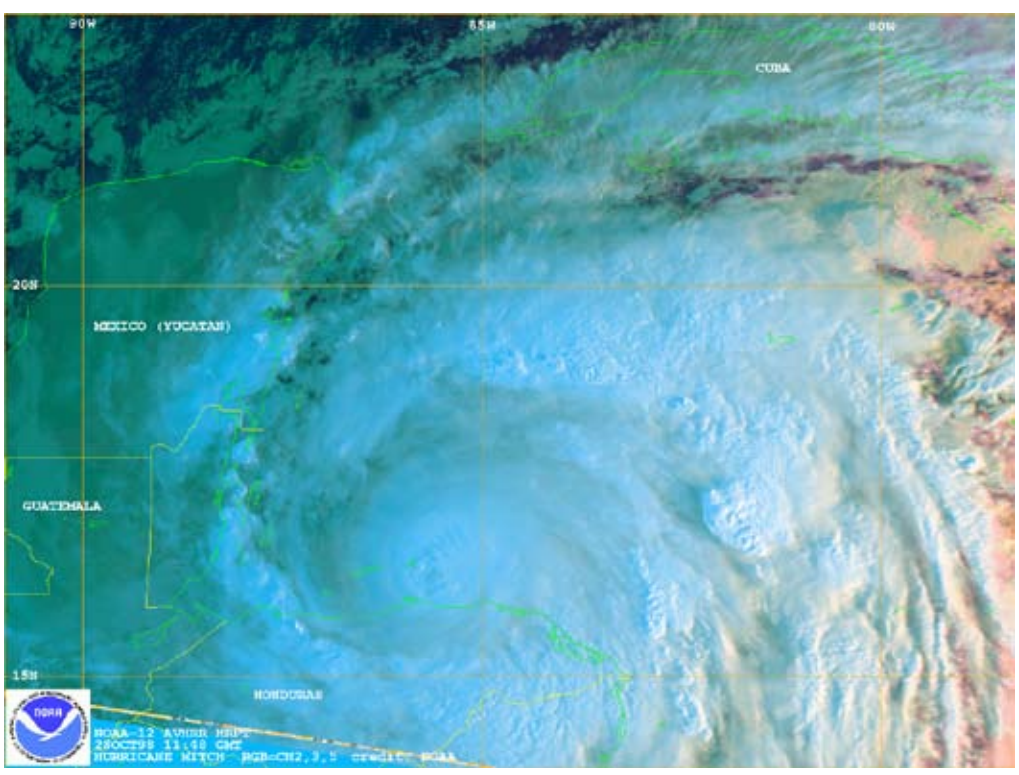
Figura 22 (abajo): Vista oblicua de la esquina superior derecha del estadio, en la imagen anterior, desde la Plaza de Lima, Madrid. Fuente: Susana de Pablos

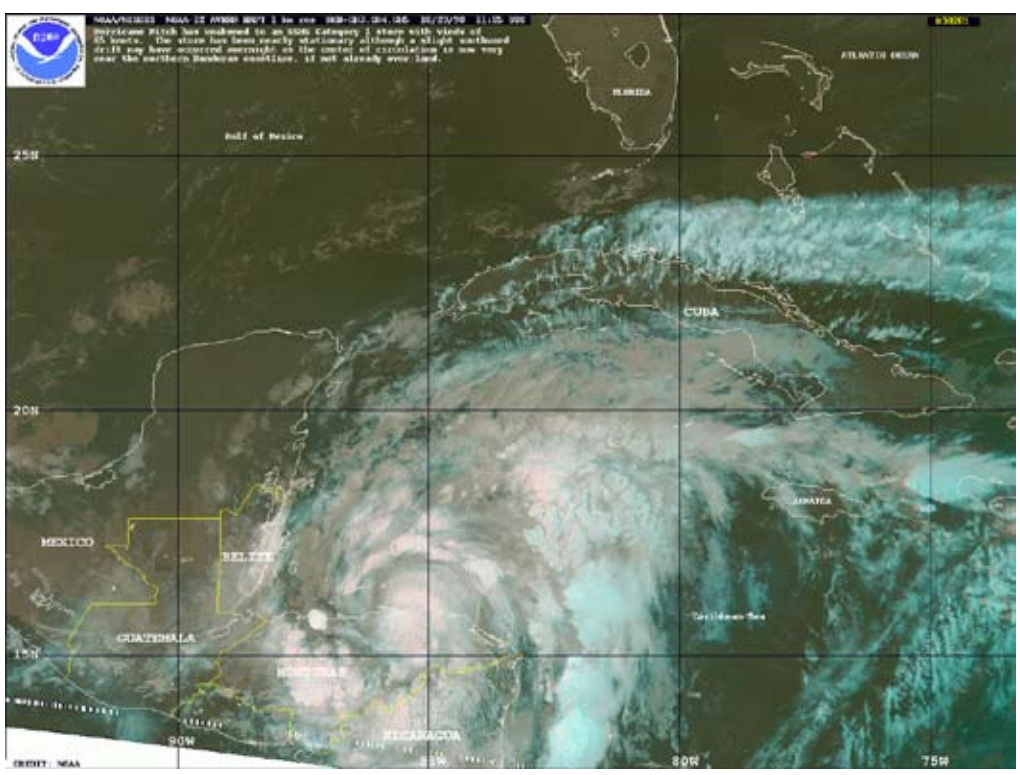


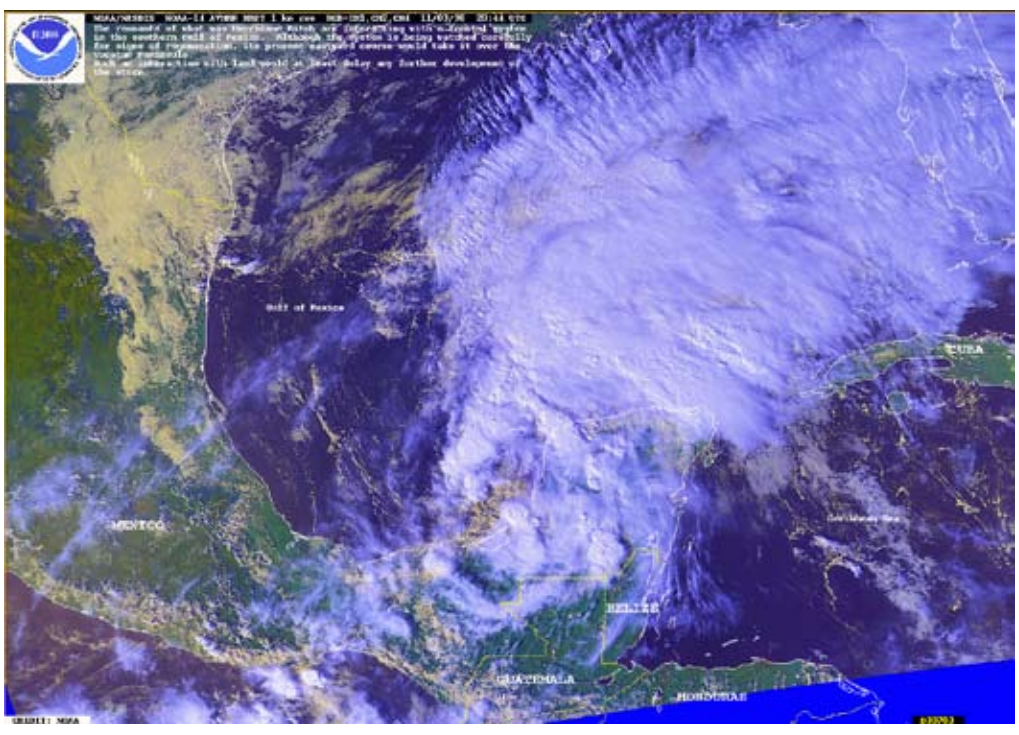
4.4. FRECUENCIA DE ADQUISICIÓN

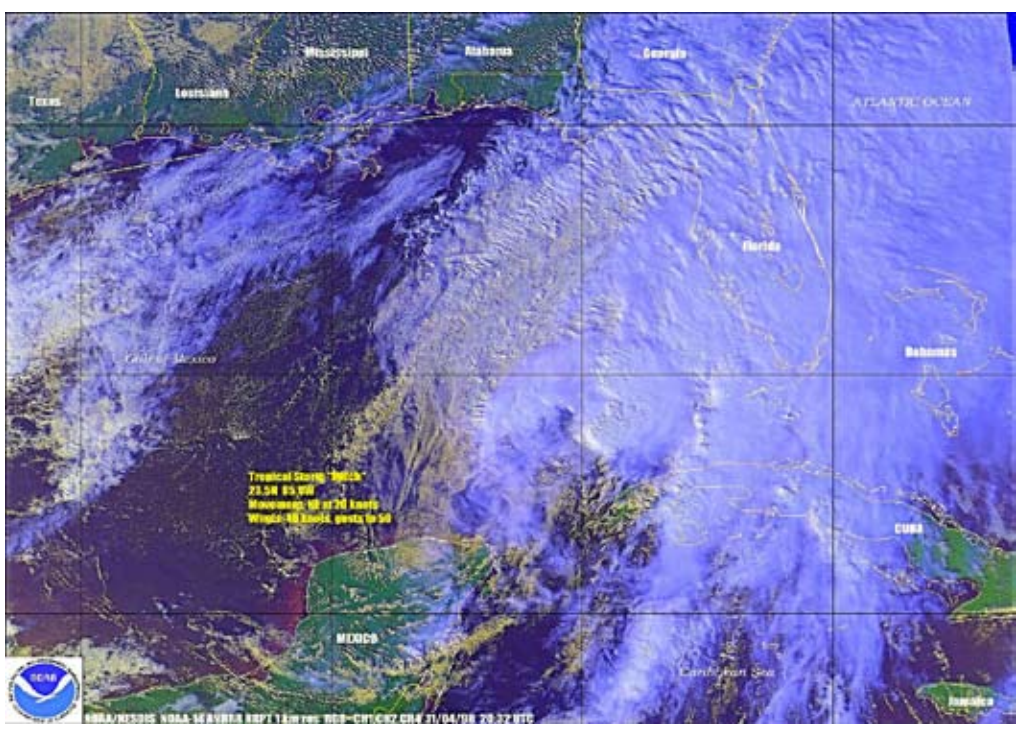












Figuras 23 (arriba a la izquierda), 24 (arriba a la derecha), 25 (centro a la izquierda), 26 (centro a la derecha), 27 (abajo a la izquierda) y 28 (abajo a la derecha): Secuencia de seis imágenes AVHRR sobre el Golfo de México, captadas los días 26, 27, 28 y 29 de octubre y 3 y 4 de noviembre de 1998, respectivamente, por los satélites NOAA 15, NOAA12 y NOAA 14.

Fuente: http://www.osei.noaa.gov/mitch.html

En función de las características de las órbitas de los satélites, éstos tienen una capacidad de revisitar un mismo territorio con una frecuencia temporal determinada. SPOT pasa cada 26 días por el mismo lugar y Landsat cada 16 días. Los satélites meteorológicos geoestacionarios están diseñados para tener una buena resolución temporal, proporcionando una imagen cada poco tiempo. Meteosat, GOES y GMS aportan una imagen cada media hora y, si se combinan varios satélites NOAA, se puede obtener una imagen cada seis horas. De esta manera, es posible hacer un seguimiento multitemporal de procesos dinámicos que ocurren muy rápidamente sobre la Tierra, como los fenómenos meteorólogicos, o multianual de procesos que ocurren a lo largo de años como los procesos de deforestación o el avance de la frontera agrícola.

Además, la hora de paso por el mismo lugar, para los satélites heliosíncronos, es la misma, de forma que se aseguran unas condiciones de iluminación homogéneas en las distintas imágenes adquiridas a lo largo de una misma estación.

En la secuencia de las figuras 23 a 28 se observa la evolución del huracán Mitch, de categoría 5, que afectó al Golfo de México y, especialmente, a Honduras y Nicaragua en 1998. En las figuras 23 y 24 se aprecia, además de la masa nubosa de forma circular, el ojo del huracán, claramente visible los días 26 y 27 de octubre de 1998.

La velocidad de los vientos llegó a alcanzar los 290 km/h. Ha sido uno de los peores huracanes registrados en las últimas décadas. Las consecuencias y las pérdidas fueron importantes. Causó miles de millones de dólares en pérdidas materiales y una cifra estimada superior a 9.000 personas muertas y otros 9.000 desaparecidos, como consecuencia de las inundaciones y de los deslizamientos de laderas (Guiney y Lawrence, 1999).

En las imágenes siguientes, desde los días 28 de octubre hasta el 4 de noviembre, se observa el debilitamiento del huracán y su transformación en una tormenta tropical. Este tipo de imágenes son herramientas de gran utilidad para los servicios de emergencia y protección civil con objeto de evacuar a la población antes de que ocurra una catástrofe.

4.5. HOMOGENEIDAD EN LA ADQUISICIÓN

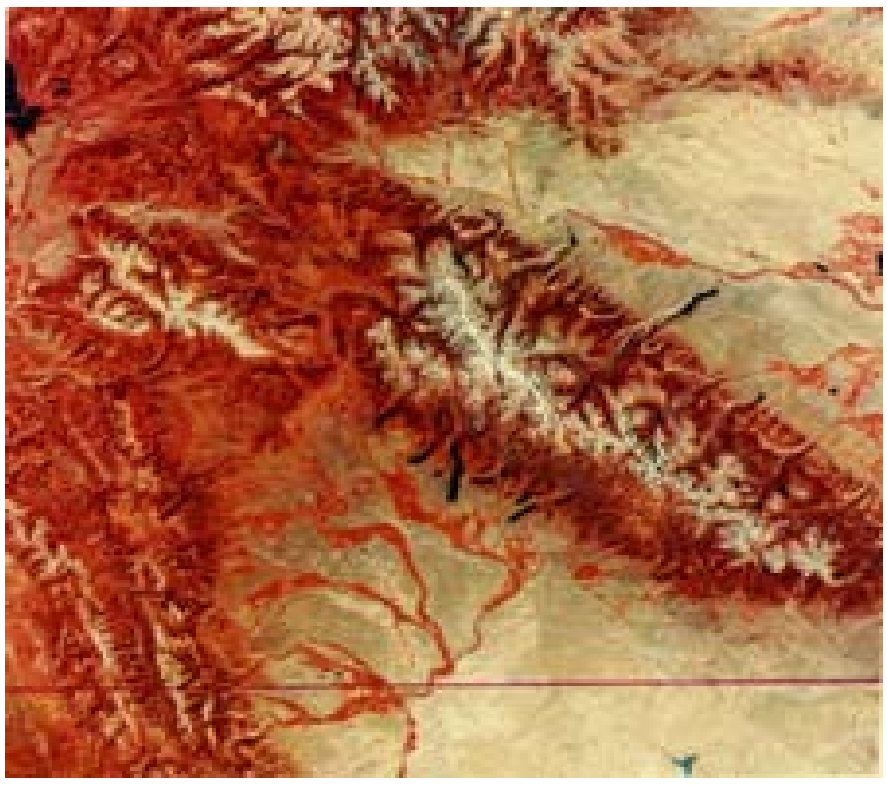


Figura 29: Imagen Landsat TM, en falso color, de la zona montañosa de Wind River, Wyoming, USA.



Figura 30: Mosaico de fotografías aéreas de la cuenca del Wind River, Wyoming, USA.

Las imágenes de satélite (figura 29) son registradas en poco tiempo y, en el caso de los satélites heliosíncronos, a una hora de paso similar, de forma que las condiciones de adquisición (hora, altura del sol sobre el horizonte, acimut) son homogéneas. De esta forma, la fotointerpretación o análisis visual de la imagen e, incluso, el tratamiento digital de la misma, se simplifica.

Por el contrario, las fotografías áereas son registradas a lo largo de días, meses y años diferentes cuando se programa la cobertura de una zona de grandes dimensiones, como por ejemplo una cuenca hidrográfica (figura 30), o el territorio de todo un país, en el caso de un vuelo de cobertura nacional. Para tener un ejemplo significativo, pongamos el caso de los vuelos nacionales de nuestro país. El vuelo americano fue realizado a lo largo de dos años, 1956 y 1957. El siguiente vuelo nacional fue realizado entre 1983 y 1985. En la actualidad, el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) está registrando el territorio, a lo largo de los últimos años, con una resolución espacial de 0,5 m.

Las campañas de vuelo se programan para cubrir largas franjas del territorio en sentido latitudinal, de W a E, cubriendo la siguiente franja meridional en sentido inverso, de E a W. En la zona de traslape (solape transversal) entre una franja y su adyacente por el N o por el S, el mismo territorio puede haber sido registrado con diferencia de días o meses, de tal forma que las condiciones de iluminación e incluso el estado de la vegetación pueden haber variado de forma significativa. Estas circunstancias se traducen en un tono o color diferente, de manera que el intérprete puede asignar un objeto o zona determinada a una categoría temática diferente en función de la franja analizada. Estas dificultades pueden reducirse si el analista se ciñe a la parte útil de la fotografía aérea, desechando las zonas periféricas de la misma que, por otra parte, son las que tienen mayores deformaciones geométricas, al estar más alejadas del nadir. También es frecuente construir mosaicos continuos con las fotografías aéreas, eliminando las zonas de solape.

4.6. OTRAS VENTAJAS

Por último, conviene insistir en que la mayor parte de los sistemas de teledetección registran las imágenes en formato digital. Los satélites, cuyas misiones tienen objetivos globales, pueden enviar la información en tiempo real. Gracias a esta capacidad de transmisión inmediata de los datos (Chuvieco, 2008), estos sistemas son muy apreciados por los servicios de emergencia y de alerta temprana internacionales y nacionales.

Como se ha dicho anteriormente, la información proporcionada puntualmente por los satélites meteorológicos mitiga los impactos de las catástrofes naturales. Igualmente, puede orientar a los directores de extinción de grandes incendios forestales en el seguimiento de los mismos y en las tomas de decisiones correspondientes en la lucha contra ellos.

Por otra parte, el formato digital de las imágenes facilita el tratamiento de los datos mediante sistemas informáticos, de manera que se agilizan las tareas de interpretación (Chuvieco, 2008), la obtención de variables biofísicas, de modelos cuantitativos y la integración de los datos derivados con otra información temática en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica, facilitando los análisis relacionales y de causalidad entre variables.

El formato numérico de las imágenes de satélite y de los modelos derivados de ellas facilita su tratamiento para ser integrados en los servidores de mapas en Internet, en los Geoportales y en las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) que proporcionan información cartográfica y espacial a los ciudadanos a través de las Tecnologías de Información y la Comunicación (TIC).

5. FENÓMENOS NATURALES

Gracias a las características de la Teledetección, que se han descrito en el capítulo anterior (frecuencia de adquisición o repetitividad de las imágenes, cobertura global y registro de la información en regiones no visibles del espectro), esta herramienta es capaz de proporcionar información espacial relevante y útil para el seguimiento de múltiples fenómenos naturales que interesan y preocupan al hombre y, de forma colectiva, a las sociedades.

En este capítulo, se han elegido una serie de imágenes captadas por diversos satélites con el objetivo de mostrar un catálogo, que no pretende de ser exhaustivo ni completo, de diversos fenómenos naturales. Entre ellos, se han destacado la ocurrencia de huracanes y tormentas tropicales, de volcanes y de inundaciones. Asimismo, se presta atención a otro tipo de fenómenos naturales que llaman la atención por las dimensiones que poseen y por sus efectos sobre la salud o sobre los sistemas de navegación aérea y marítima, como las tormentas de arena relacionadas con los grandes desiertos del mundo. Por último, se ha reservado un espacio a las grandes geoformas o megaformas, que son claramente visibles desde el espacio. Desde esta perspectiva global, se comprenden mejor sus formas y sus estructuras.

Los incendios forestales se van a comentar en el siguiente capítulo porque, aunque una parte de los mismos están vinculados a determinados fenómenos naturales, como las lavas y materiales volcánicos incandescentes o la caída de rayos, la mayor parte de ellos están asociados al riesgo humano como consecuencia, entre otras muchas causas, de las diversas actividades y negligencias humanas tales como las quemas de residuos agrícolas y de masas forestales, por las chispas o focos de ignición causados por las máquinas que trabajan o atraviesan zonas forestales o generados desde las carreteras, caminos y vías férreas, además de la intencionalidad relacionada con motivos de venganza o con patrones de conducta anómalos.

5.1. RIESGOS NATURALES

Los riesgos naturales pueden definirse como la probabilidad de que ocurra un desastre natural, de origen geológico o geomorfológico, meteorológico, hidrológico o biológico, en una zona determinada, afectando a la población asentada sobre ella y a las infraestructuras, bienes y propiedades. Aunque se denominan naturales, no significa que el riesgo se refiera, exclusivamente, a algún fenómeno natural. Puede ocurrir que en su origen esté involucrado el hombre, que el riesgo sea consecuencia de la acción antrópica o que sus efectos se agraven por la acción directa o indirecta de las actividades humanas. Los riesgos naturales tienen una dimensión multiescalar, de forma que pueden ocurrir a escala local, regional o global.

Toda la literatura escrita sobre los riesgos se muestra de acuerdo en señalar que éstos son el resultado del producto de dos componentes, el peligro y la vulnerabilidad. El peligro se mide mediante una función probabilística de la ocurrencia de un fenómeno natural con consecuencias negativas debidas a su extensión, intensidad y duración. Se suelen tener en cuenta los periodos de recurrencia de estos fenómenos. La vulnerabilidad está relacionada con el impacto de un fenómeno natural determinado sobre las vidas humanas, propiedades, la fauna, flora y el resto de los recursos naturales. Puede medirse en función del valor de los recursos dañados o las pérdidas producidas por la ocurrencia de dicho fenómeno natural. La vulnerabilidad depende de la respuesta de la población frente al riesgo y, por tanto, de la eficacia de los planes de prevención y lucha contra los diversos desastres naturales de una sociedad.

Aunque el hombre y las sociedades no pueden evitar la ocurrencia de estos fenómenos y los desastres naturales que ocasionan, sin embargo sí tienen capacidad para comprender los mecanismos que los originan y para prevenirlos, mitigando sus efectos. Los servicios de prevención, de alerta temprana, de emergencias y de protección civil centran su atención en estos objetivos.

El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha definido un Índice de Riesgo de Desastre (IRD), definido con un nivel mundial de observación y un nivel nacional de resolución. Su objetivo es comparar los países en función de los efectos que producen las tres principales amenazas naturales: los terremotos, los ciclones tropicales y las inundaciones. Estos tres fenómenos son los responsables del 39% de las víctimas mortales que se cobran los desastres naturales de mediana o gran escala en todo el mundo.

En 2008, los desastres naturales ocasionaron unas pérdidas económicas estimadas en 181.000 millones de dólares y la muerte de 235.816 personas en todo el mundo (González, 2009). En el primer caso, las pérdidas estuvieron explicadas por los efectos del terremoto en China y del huracán Ike en Estados Unidos. En el segundo caso, el ciclón Nargis y el terremoto de Sichuán fueron los dos fenómenos naturales que ocasionaron el mayor número de muertos.

5.1.1. HURACANES

Según la mitología maya, *"Hurakan"* es el nombre de un dios relacionado con el viento y las tormentas.

Huracán es uno de los sustantivos con los que se designan los ciclones tropicales en el Atlántico Norte. Otros términos como tifón, ciclón tropical o depresión tropical son igualmente usados o preferidos en otras zonas del mundo.

Los ciclones tropicales son sistemas de tormentas que circulan alrededor de centros de baja presión atmosférica y que producen fuertes vientos y abundantes lluvias. Su estructura está compuesta por tres elementos: un ojo, la pared del ojo y las bandas lluviosas.

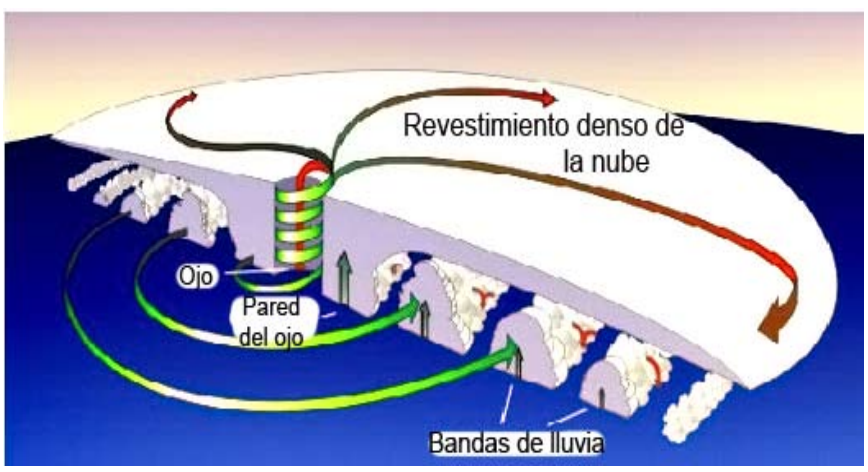
El ojo del huracán es el área central del mismo que se encuentra libre de nubes. Por él, descienden los vientos de retorno del huracán hacia la superficie del océano para retroalimentar el ciclón tropical. Tiene una forma circular y su tamaño es variable, oscilando entre 3 y 370 kilómetros de diámetro.

La pared del ojo es una banda que se sitúa alrededor del ojo. A través de la pared, los vientos húmedos, en contacto con las cálidas aguas oceánicas, ascienden a gran velocidad, condensándose rápidamente. Se trata de grandes fenómenos convectivos. Las nubes formadas alcanzan las máximas alturas y se producen lluvias muy intensas. La condensación imprime mayor velocidad a los vientos ya que una parte de la energía liberada se transforma en energía mecánica.

Las bandas lluviosas son las masas de nubes que rodean al ojo y a su pared y que ocasionan intensas lluvias en las zonas que atraviesan. Giran, de forma ciclónica, en torno a la depresión como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, también conocido como efecto de Coriolis. En el hemisferio norte giran en sentido contrario a las agu-

Figura 31: Imagen del huracán Andrew tomada, por el satélite geoestacionario GOES, el 25 de agosto de 1992 sobre el Golfo de México. Fuente: www.visibleearth.nasa.gov

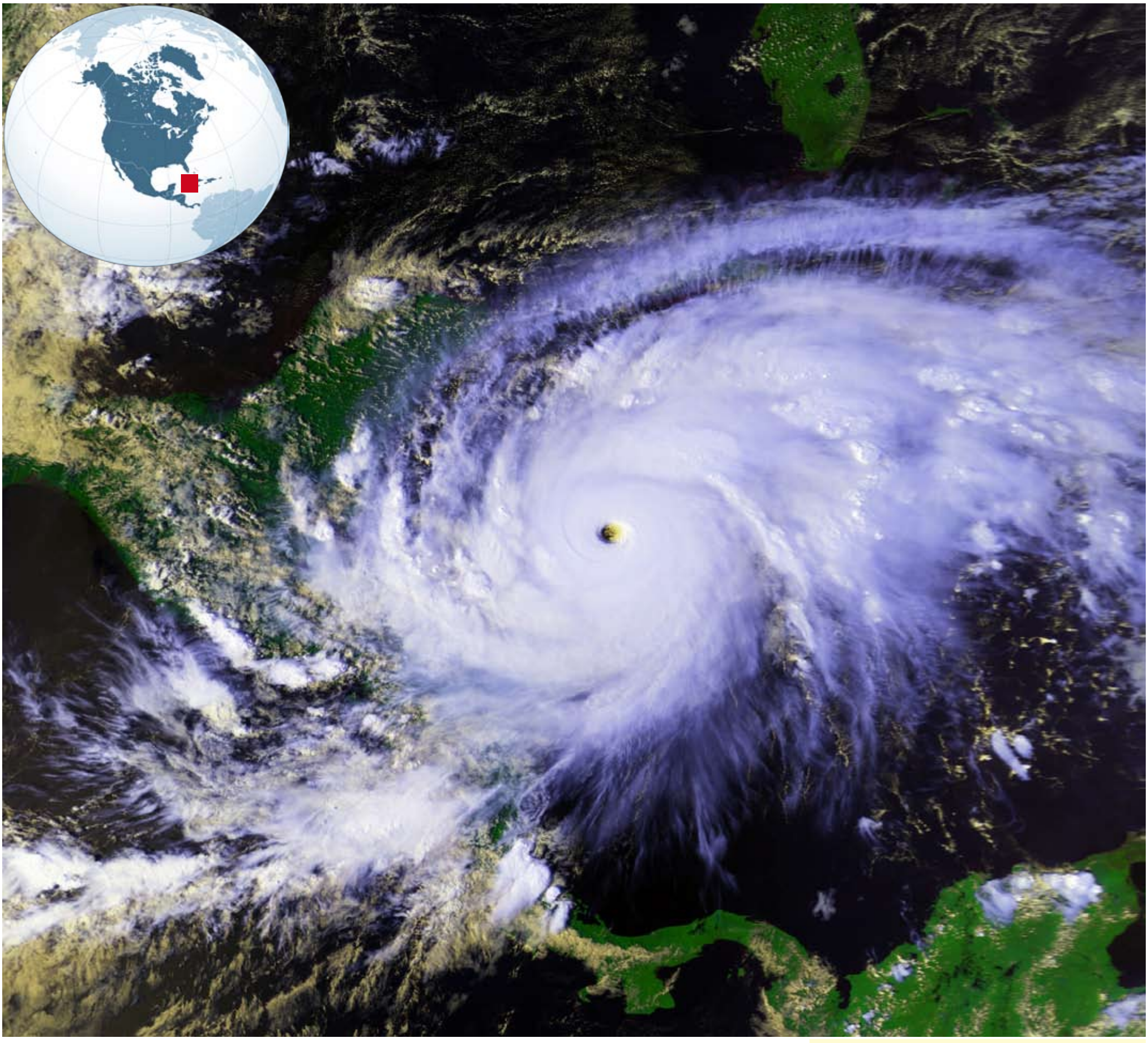
jas del reloj mientras que en el hemisferio sur lo hacen en el sentido de las agujas del reloj. Las masas nubosas son divergentes, en todas las direcciones, desde el centro del ciclón hacia la periferia, de forma centrífuga. En altura, los vientos ascendentes giran de forma anticiclónica. Estos vientos retornan a la superficie a través del centro del ojo, en sentido descendente, para retroalimentar este sistema ciclónico. Los huracanes se forman cuando concurren una serie de circunstancias.



Entre ellas, es importante señalar la temperatura de las aguas oceánicas, que deben ser superiores a 26,5º hasta una profundidad de, al menos, 50 m. La humedad que conlleva esta temperatura del agua es fundamental para sostener el fenómeno de convección, clave para el origen y funcionamiento de los huracanes. Además, se debe producir un enfriamiento rápido, en altura, de las masas de aire ascendentes, de tal manera que se produzca la expulsión del calor latente, fuente de energía de los huracanes. Por norma general, los ciclones tropicales se producen en la *Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)* y, de forma especial, en una franja comprendida entre los 5 y 20º de latitud norte o sur, allí donde la fuerza de Coriolis es más intensa y desvía las masas nubosas hacia los centros de bajas presiones. Aunque cada zona tiene un patrón específico de ocurrencia, puede decirse que, a nivel mundial, los huracanes se forman principalmente a finales del verano. El mes de mayor probabilidad de ocurrencia es septiembre.

Figura 32 (izquierda): Estructura de un huracán.

Tomado de http://www.snet.gob.sv/ver/seccion+educativa/meteorologia/huracanes/estructura/



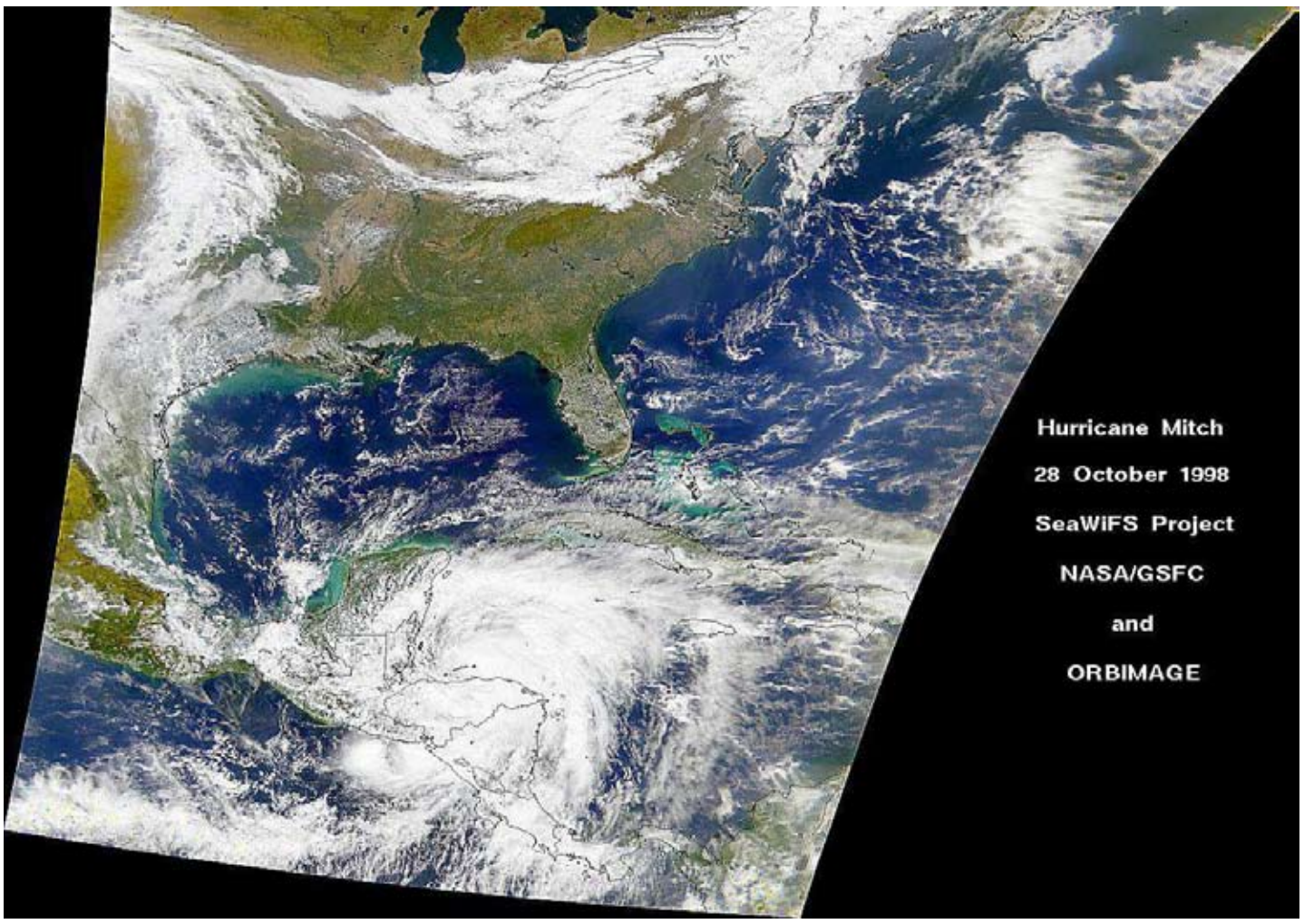


Figura 33 (arriba): Imagen, en color natural, del huracán Mitch sobre el Golfo de México, tomada por el satélite GOES, el 26 de octubre de 1998.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Hurricane_Mitch_1998_oct_26_2028Z.jpg

Figura 34 (izquierda): Imagen, en color natural, del huracán Mitch tomada el 28 de octubre de 1998 por el sensor oceanográfico SeaWIFS, a bordo del satélite Orbview-2.

Figura 35 (derecha, en página siguiente): Imagen, en color natural, del huracán Hernán, al sur de la península de Baja California, en el Pacífico Noreste. Ha sido captada el 3 de septiembre de 2002 por el sensor hiperespectral MODIS, a bordo del satélite TERRA. Los huracanes que tocan California son extremadamente raros.

Cortesía de Jacques Descloitres, MODIS Land Rapid Response Team at NASA GSFC.





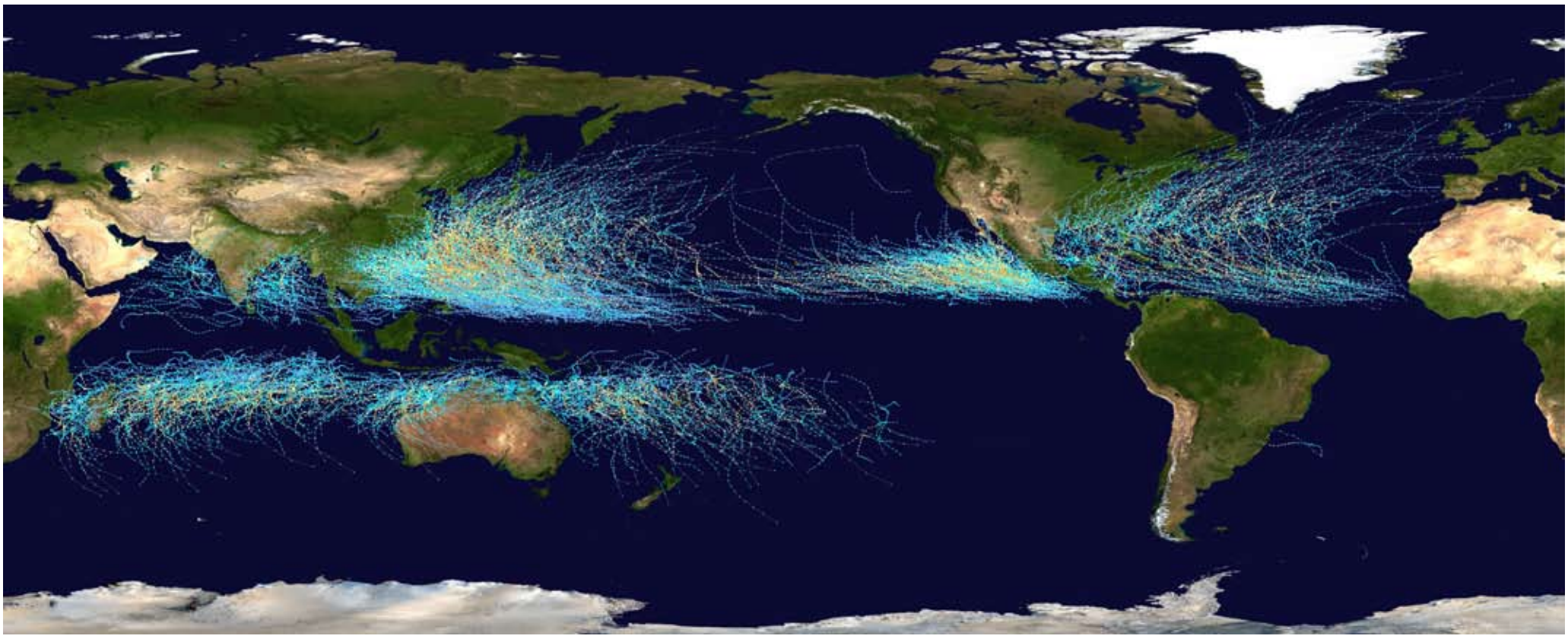


Figura 36: Distribución geográfica de la ocurrencia de huracanes entre 1985 y 2005.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Global_tropical_cyclone_tracks-edit2.jpg

A nivel mundial, aunque hay algunas zonas atípicas, puede decirse que existen siete zonas donde, habitualmente, ocurren los ciclones tropicales (figura 36). Estas regiones, donde se concentran las líneas azules que representan las trayectorias de los huracanes, son el Atlántico Norte, Pacífico Noreste, Pacífico Noroeste, Pacífico Suroeste, Índico Norte, Índico Sureste e Índico Suroeste. Siguiendo el mismo orden, las zonas emergidas más afectadas son las siguientes: en el Atlántico Norte, la costa sureste de Estados Unidos, México, América Central y las islas caribeñas (grandes y pequeñas Antillas). En el Pacífico Noreste, las costas occidentales de México y de América Central, Hawai y, ocasionalmente, las costas de California. En el Pacífico Noroeste, las zonas costeras de China, Japón, Taiwan, Corea del Sur, Vietnam e Indonesia, además de numerosas islas de Oceanía y Filipinas. En el Pacífico Suroeste, las costas australianas de Queensland, Papúa Nueva Guinea y la Polinesia, Micronesia y Melanesia. En el Índico Norte, las costas del Golfo de Bengala (Sri Lanka, India, Bangladesh, Birmania y Tailandia) y, ocasionalmente, las zonas costeras del Mar Arábigo. En el Índico Sureste, las costas occidentales de Indonesia y de Australia. Finalmente, en el Índico Suroeste, los huracanes afectan a las costas de Madagascar, Mozambique, Isla Mauricio y Kenia.

La Organización Meteorológica Mundial asigna a cada ciclón tropical un

Figura 37: Imagen del huracán Katrina tomada, por el satélite NOAA en color natural, el 28 de agosto de 2005.
Fuente: http://www.class.noaa.gov/

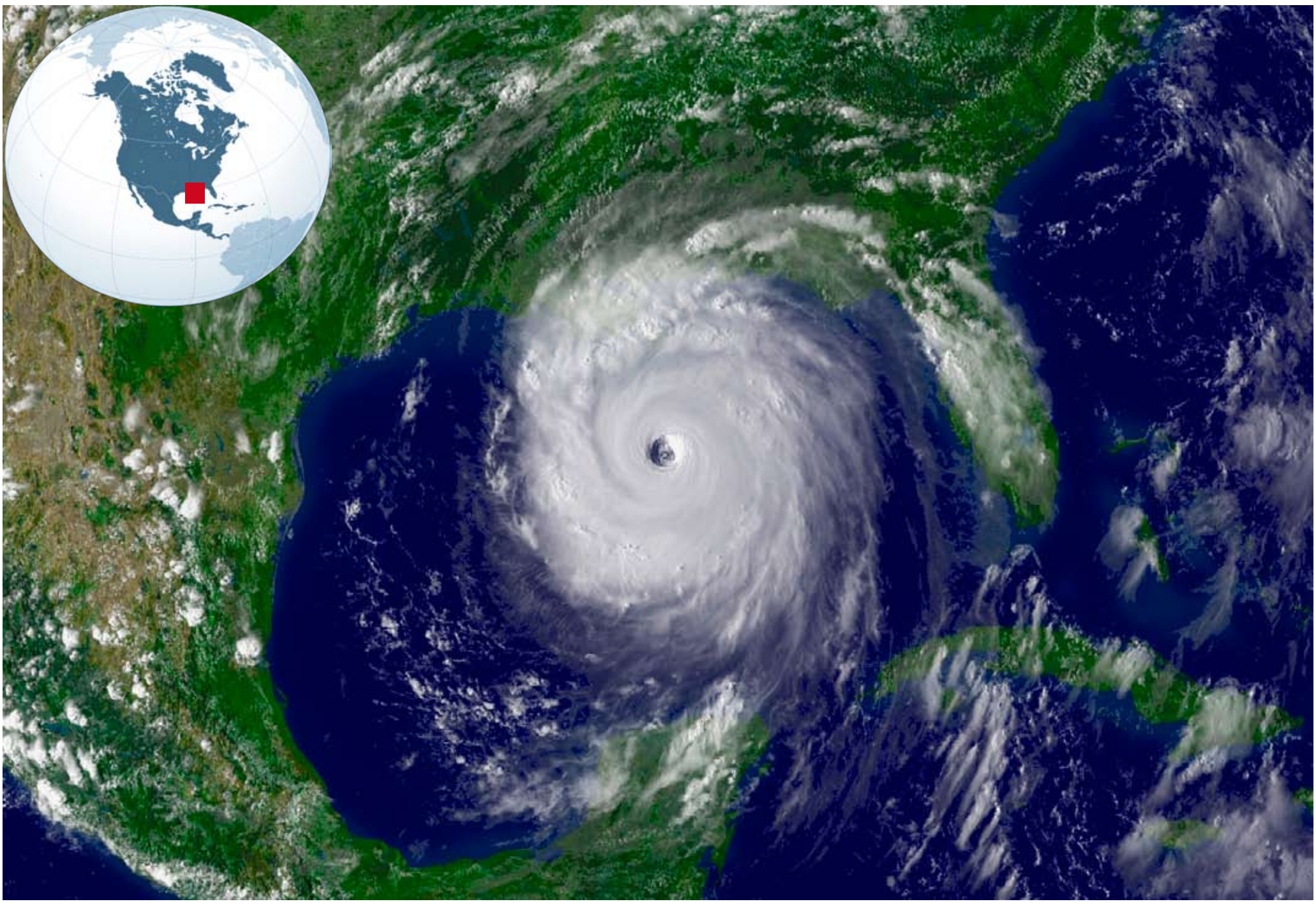


Figura 38: Vista oblicua del huracán Katrina.
Fuente: http://www.class.noaa.gov/

nombre propio, con objeto de facilitar su identificación a los servicios de emergencia, a las compañías de seguros y a la población. Los comités regionales de esta organización preparan listas de nombres en las que se alternan los nombres masculinos y femeninos de los huracanes. Una vez que comienza la temporada de huracanes se van asignando nombres de la lista a cada uno de ellos, por orden alfabético. Estas listas se renuevan cada ciertos años. Si algún tifón ha tenido una fuerza devastadora y ha ocasionado daños importante, su nombre es eliminado de la lista de la región donde ha ocurrido.

Los huracanes son clasificados en cinco categorías según la escala de Saffir-Simpson. Esta escala la diseñaron, en 1969, el ingeniero civil Herbert Saffir, que trabajaba para Naciones Unidas, y el director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, Bob Simpson. Esta escala se basa en la velocidad de los vientos, en la presión atmosférica del ojo del huracán, en los daños potenciales sobre los edificios y en los efectos del oleaje y de las inundaciones. La velocidad del viento está medida como la velocidad media en un minuto.



Figura 39 (izquierda): Imagen Landsat 7- ETM de Nueva Orleans, captada el 26 de abril de 2000. La ciudad se observa en tonos de gris, al sur del lago Pontchartrain, la masa azulada del centro de la imagen. En el tercio meridional de la ciudad, el río Mississippi la atraviesa de oeste a este, describiendo meandros pronunciados. La ciudad está rodeada por grandes masas y corrientes de agua, además de la densa red de canales que atraviesan sus calles. Topográficamente, el 70% de la ciudad está localizado por debajo del nivel del mar. Su situación entraña un elevado riesgo de inundación, resultando, además, altamente vulnerable ante el paso de un huracán de máxima intensidad, como Katrina.

Fuente:http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/2000/2158/landsat_new_orleans_nfl_lrg.jpg Cortesía de Robert Simmon.

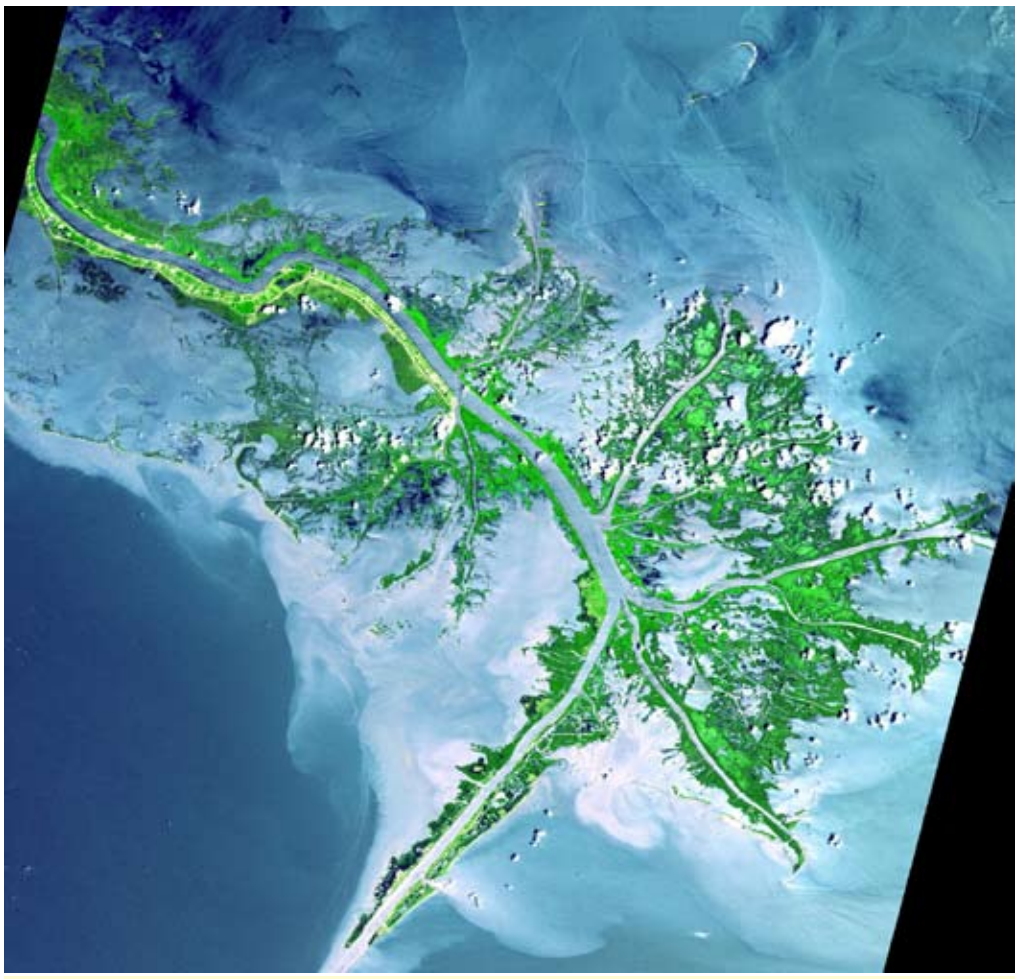


Figura 40: Imagen ASTER, captada el día 24 de mayo de 2001 sobre el delta del Mississippi, una de las áreas afectadas, años después, por el paso del huracán Katrina.
Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

Otro sistema para designar su tamaño consiste en medir su radio, es decir, la distancia entre el ojo del huracán y la isobara externa más cercana. Si el radio es inferior a 2º de latitud (222 km), el huracán se considera muy pequeño. Por el contrario, los ciclones tropicales muy grandes tienen radios superiores a 8º.

Los efectos producidos por los huracanes son conocidos y temidos. Entre otros, se destacan los fuertes vientos que ocasionan daños sobre los edificios, infraestructuras y vehículos. Igualmente, las marejadas, el elevamiento del nivel del mar y las intensas lluvias asociadas ocasionan inundaciones y deslizamientos de laderas. Otros efectos secundarios son la aparición de enfermedades y los cortes en las redes energéticas y de transporte.

El huracán Katrina ocasionó, en 2005, la muerte de 1.836 personas, la desaparición de otras 705 personas y unas pérdidas valoradas en 81.200 millones de dólares. Katrina ha sido uno de los ciclones tropicales más mortíferos, destructivos y costosos de los últimos años. Se formó el día 24 de agosto de 2005 sobre las Bahamas y tocó tierra en Florida, aunque entonces estaba clasificado en la categoría 1. Sobre las cálidas aguas del Golfo de México se reactivó, convirtiéndose en un huracán de categoría 5. La presión atmosférica en el ojo del huracán era muy baja, de 902 mb. Alcanzó vientos sostenidos de 280 km/h. El 29 de agosto de 2005 tocó de nuevo tierra en la frontera entre los estados de Louisiana y Mississippi. Las autoridades de Nueva Orleans ordenaron la evacuación completa de la ciudad. Los diques que separan la ciudad del lago Pontchartrain se rompieron y, el 30 de agosto de 2005, el 80% de la ciudad se inundó. Otras áreas afectadas fueron Bahamas, Cuba, Florida, Alabama y otros estados orientales de Estados Unidos. Además, Katrina obligó a interrumpir la actividad petrolífera del Golfo de México. Consta que una veintena de plataformas petrolíferas se perdieron o fueron dañadas por el temporal. Debido a los daños producidos y a las muertes ocasionadas, el nombre de Katrina ha sido retirado de la lista de nombres a asignar a los huracanes de la región. Su nombre será reemplazado por Katia en la temporada de 2011.

Igualmente, otros huracanes han ocasionado pérdidas importantes. El paso del huracán Andrew, de categoría 5, generó, entre el 16 y el 28 de agosto de 1992, unas pérdidas de 40.700 millones de dólares y el fallecimiento de 26 personas, de forma directa, y de otras 39 personas, de forma indirecta. Se trata del segundo huracán más costoso de la historia, después de Katrina. Recientemente, el tifón Ketsana, de categoría 4, se ha formado sobre el Pacífico Noroeste desplazándose hacia las costas surorientales de Asia, afectando, principalmente, a Filipinas, Vietnam, Camboya y Tailandia.

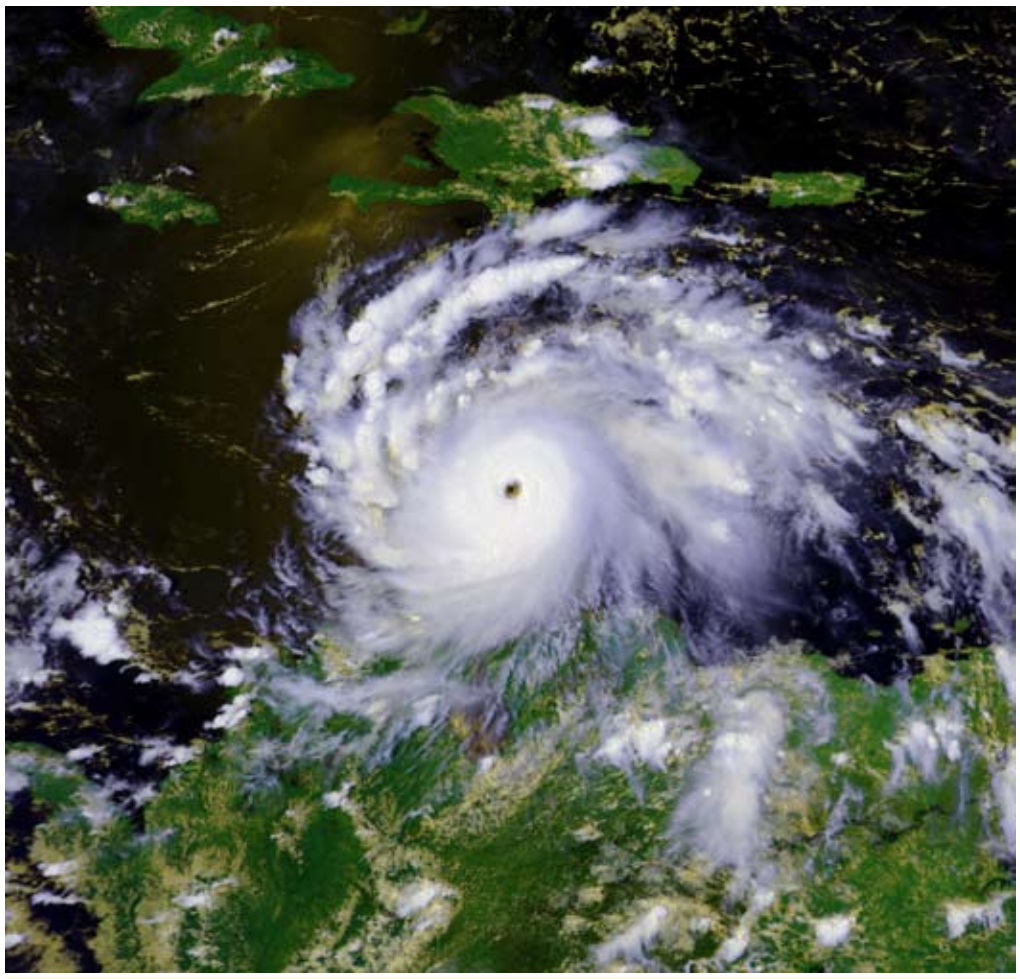


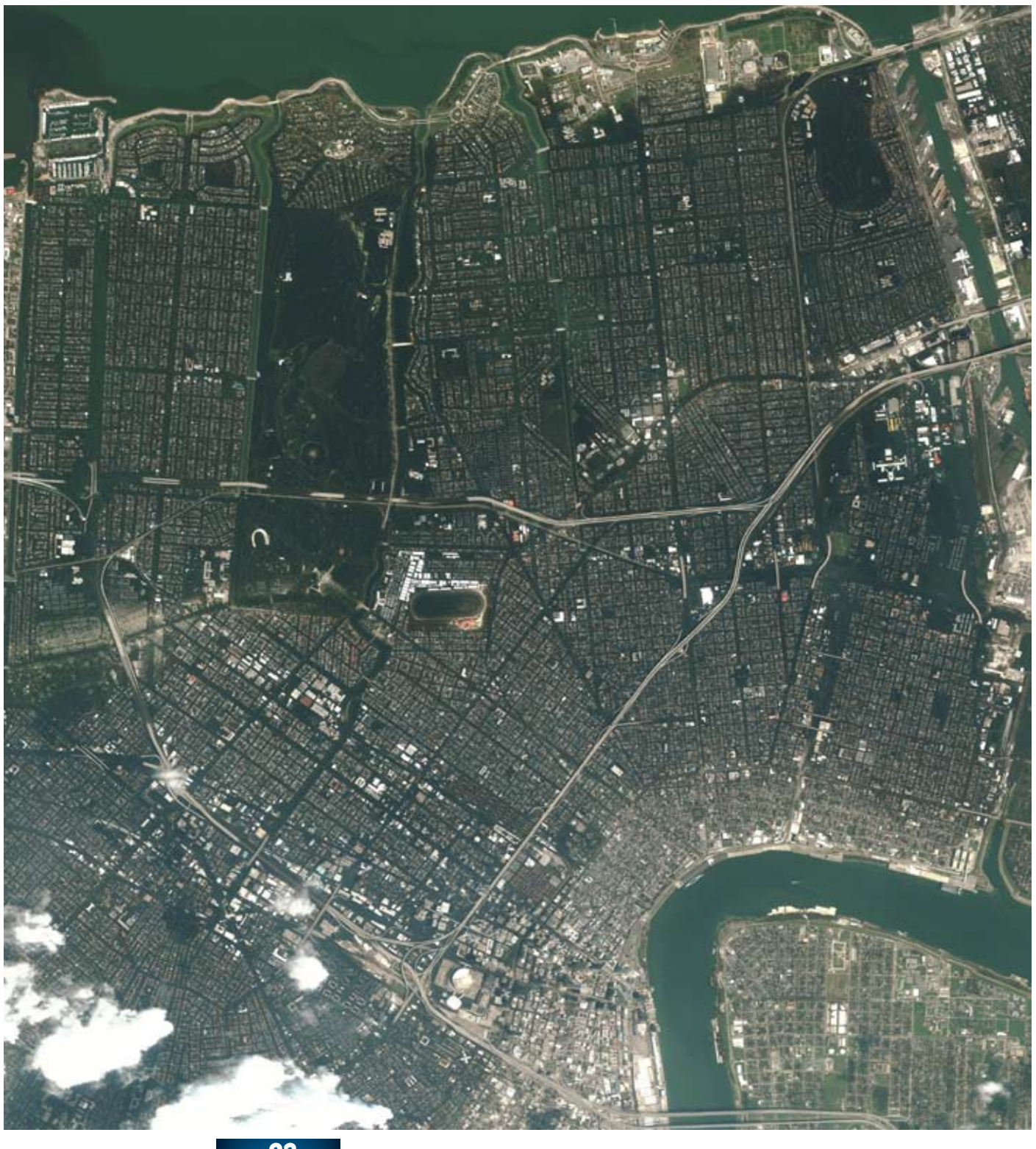
Figura 41: Imagen, en color natural, del huracán Félix, tomada por NOAA-18, el 2 de septiembre de 2007 sobre el Mar Caribe. Adquirió categoría 5. Fallecieron 133 personas.
Fuente: http://www.class.noaa.gov/

Figura 42: Vista oblicua de la ciudad de Nueva Orleans, tomada el 29 de agosto de 2005. Se observan los efectos del huracán Katrina. El bulevar West End se encuentra inundado así como su confluencia con la autopista interestatal 10. Además de las intensas precipitaciones caidas, la rotura del dique del canal de la calle 17, al oeste, fue la causa principal de la inundación de gran parte de la ciudad, situada por debajo del nivel del mar.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:KatrinaNewOrleans Flooded_edit2.jpg



Figuras 43 (derecha) y 44 (abajo a la derecha): Imágenes QuickBird sobre New Orleans, tomadas el 9 de marzo de 2004 y el 31 de agosto de 2005, respectivamente. Comparando ambas, puede observarse el impacto de Katrina sobre la ciudad. El sector comprendido entre el puerto y el lago, al norte, y el Mississippi, al sureste, se encuentra completamente inundado. Viviendas, infraestructuras y equipamientos se han visto afectados por las inundaciones provocadas por las intensas lluvias asociadas a Katrina.
Fuente: www.digitalglobe.com





La depresión tropical, denominada 17W inicialmente y conocida en Filipinas con el nombre local de Ondoy, cambió su nombre a Ketsana. Comenzó el 23 de septiembre de 2009 como una depresión tropical de pequeña intensidad, en el centro-oeste del Mar de Filipinas. Tocó tierra, en la costa oriental de la isla de Luzón, por la tarde del día 26 de septiembre.

Se intensificaron las lluvias provocadas por Ketsana al llegar a Manila y a la costa occidental de la isla de Luzón como consecuencia de la interacción entre el nivel inferior de circulación del tifón y el monzón estacional del suroeste. Estos vientos suelen ser dominantes entre junio y septiembre, aportando aires cálidos y húmedos, tras recorrer el Mar de China Meridional. El sentido de circulación de los vientos asociados a Ketsana, en el sentido de las agujas del reloj, realzó el efecto del monzón, provocando lluvias torrenciales. En las primeras 6 horas que toca tierra, se registraron 341 mm, superando el récord de 334 mm en 24 horas que se registró en junio de 1967 en Manila. Este volumen de precipitaciones equivale a la cantidad que, habitualmente por estas fechas, se registra en un mes completo.

Según la Administración de Servicios Atmosféricos, Geofísicos y Astronómicos de Filipinas (PAGASA), durante el sábado 26 de septiembre, Manila registró unas precipitaciones de 455 mm en tan sólo 24 horas. El satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) es utilizado para hacer el seguimiento de las lluvias tropicales provocadas por huracanes y tifones. Es una misión conjunta de NASA y de la agencia japonesa de exploración aeroespacial. Los datos captados por TRMM, en el periodo semanal comprendido entre el 21 y el 28 de septiembre, verifican los registros obtenidos a través de fuentes convencionales. Estos datos han sido empleados para construir un mapa tridimensional de las lluvias caídas en Filipinas a lo largo de esa semana.

Además de los 400 fallecimientos provocados por Ketsana, de los centenares de miles de personas evacuadas y de los más de dos millones de hogares afectados, los daños materiales ascienden a 101 millones de dólares en Filipinas y a 168 millones de dólares en Vietnam, según las valoraciones iniciales. La presidenta de Filipinas, Gloria Macapagal Arroyo, declaró el estado de catástrofe en la capital y en otras 25 provincias más, situadas, principalmente, en la isla de Luzón.

Figura 45: Imágenes de Nueva Orleans, captadas por el satélite IKONOS. A la izquierda, vista tomada el 13 de mayo de 2001. A la derecha, imagen registrada el 2 de septiembre de 2005. Los efectos de las inundaciones son evidentes en esta última. El sector urbano situado al este del canal de la calle 17 y al sur del puerto sobre el lago Pontchartrain está completamente anegado. El 2 de septiembre de 2005, el 85% de la ciudad se encontraba inundada, alcanzando la lámina de agua un espesor de hasta 7 m. en algunos sectores. Fuente: Space Imaging.



Figuras 46 (izquierda) y 47 (abajo): Imágenes de las inundaciones provocadas, en Filipinas, por el tifón Ketsana de 2009.
Fuentes: News-CN-AFP y EFE.





Figura 48: Efectos de las inundaciones ocasionadas por el huracán Katrina sobre la ciudad estadounidense de Nueva Orleans. Imagen tomada por Landsat 7, el 15 de septiembre de 2005.

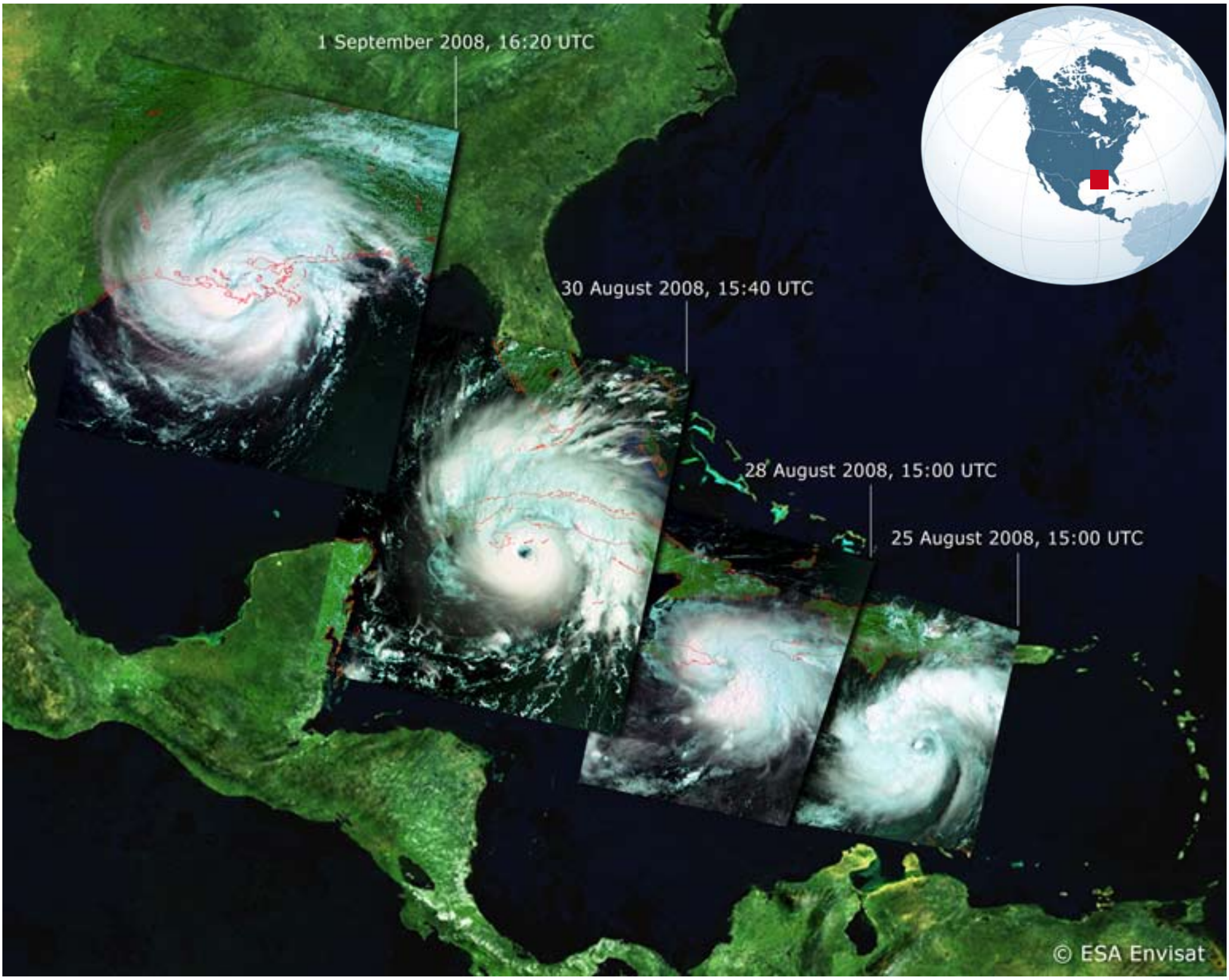


Figura 49: Secuencia de imágenes, captadas por ENVISAT, que muestra la evolución del huracán Gustav desde el 25 de agosto (imagen de la derecha) hasta el 1 de septiembre de 2008 (imagen de la izquierda). El huracán se formó a 400 km. al sureste de Puerto Príncipe (Haití) y, como puede observarse, el huracán recorre el Mar Caribe, afectando a las islas Caimán, Jamaica, República Dominicana, Haití, Cuba, la península de Florida y se adentra en el Golfo de México y en los estados de Louisiana, Alabama y Mississippi. En su evolución, este huracán tuvo distintas intensidades, debilitándose y reactivándose en distintos momentos, llegando a alcanzar la categoría 5. Ocasionó 138 fallecidos y unos daños materiales valorados en 20.000 millones de dólares. Los vientos alcanzaron velocidades de 220 km/h. Se suspendió el 78% de la producción de crudo en el Golfo de México y el 37% de la producción de gas natural.

Fuente: ESA. http://www.esa.int/esa-mmg/mmg.pl?b=b&keyword=gustav&single=y&start=2

Figura 50 (arriba): imagen del tifón Ketsana, de categoría 4, tomada por el sensor MODIS, a bordo del satélite TERRA, el día 28 de septiembre de 2009, aproximándose a las costas de Vietnam. Este tifón se formó en el Pacífico Noroeste y siguió una trayectoria de oeste a este, afectando, principalmente, a las islas septentrionales de Filipinas. Más tarde, se desplazó a través del Mar de China Meridional, ocasionando daños en los estados de China, Vietnam, Camboya y Tailandia. En Filipinas ocasionó la muerte de 246 personas y el desplazamiento de más de 450.000 afectados por las inundaciones, deslizamientos de laderas y derrumbe de edificios. Alcanzó vientos de 165 km/h.

Fuente: http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2009271-0928/Ketsana.A2009271.0330.250m.jpg



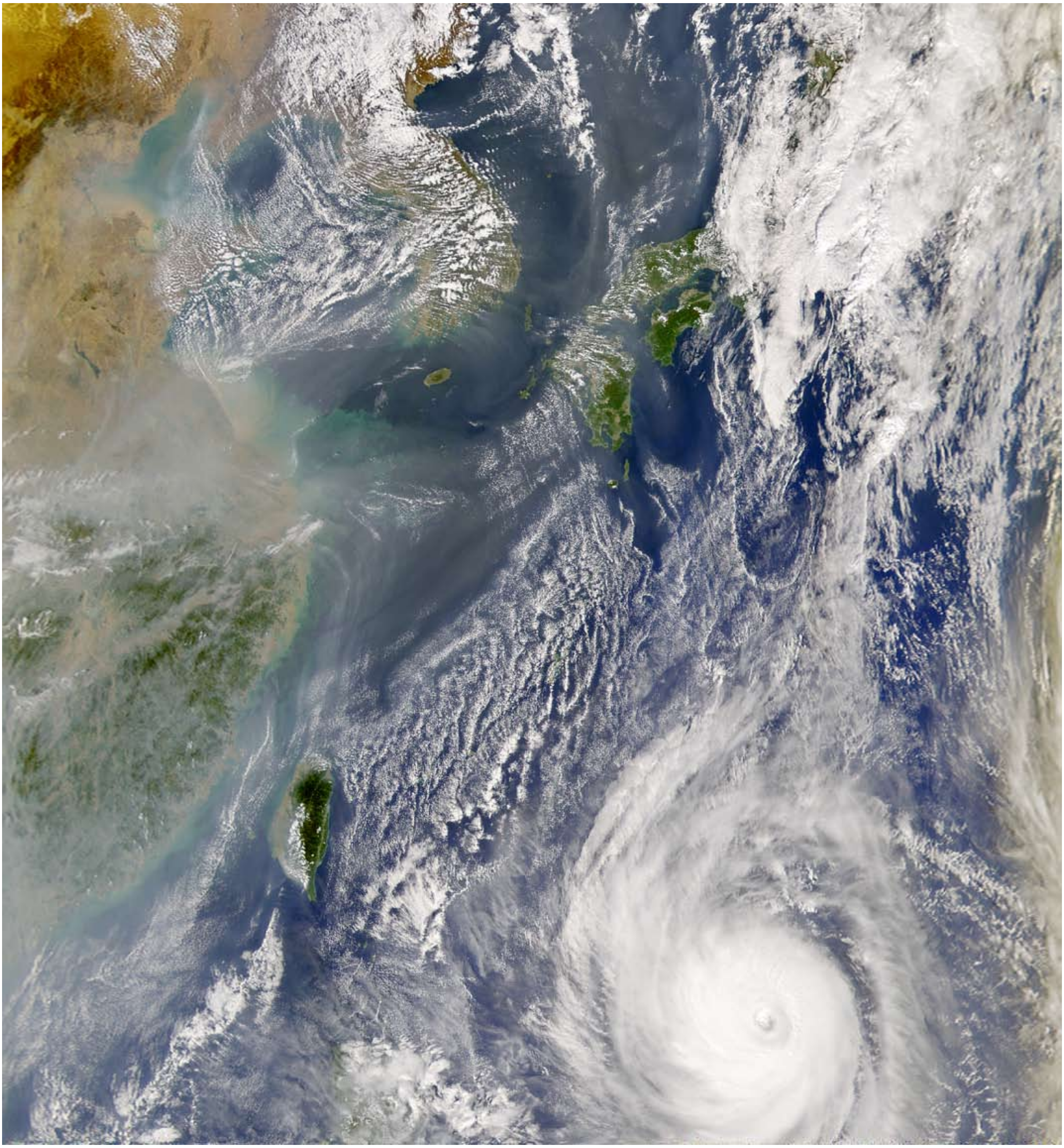




Figura 51 (arriba): A algunos tifones o huracanes se les asignan nombres repetidos en las distintas regiones del mundo, de acuerdo a las listas confeccionadas por los comités regionales. Este es el caso del tifón Ketsana. Además del ocurrido en 2009, Ketsana fue otro tifón formado en el Pacífico Noroeste el 18 de octubre de 2003 y afectó a las mismas zonas hasta el día 22 de octubre. En la figura superior se observa una imagen de este huracán, tomada el día 22 de octubre de 2003 por el sensor oceanográfico SeaWiFS, a bordo del satélite OrbView-2. En ese momento, Ketsana se encontraba a 600 km, al sureste de Taiwan. Se registraron vientos con una velocidad de 230 km/h.

Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center y ORBIMAGE

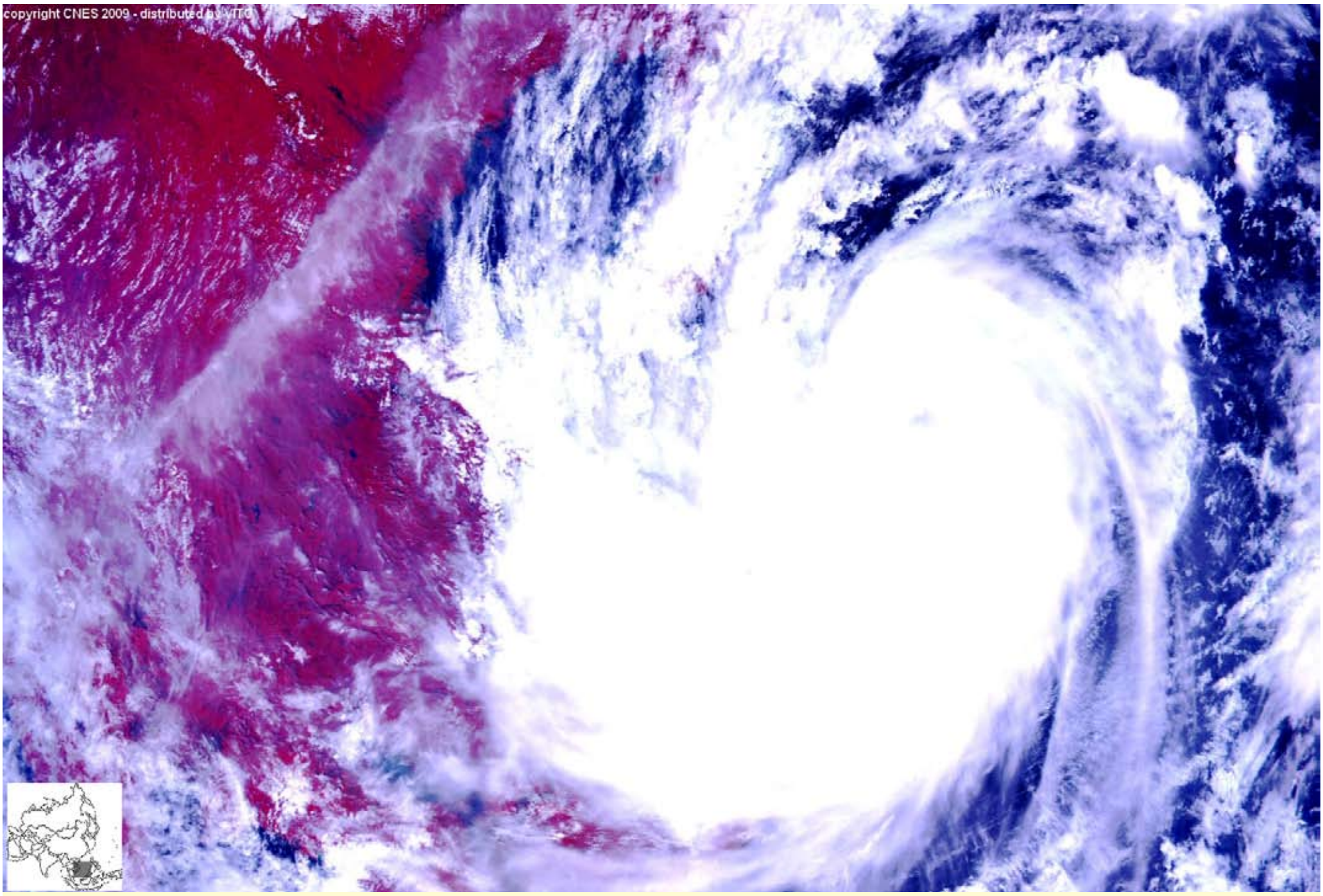
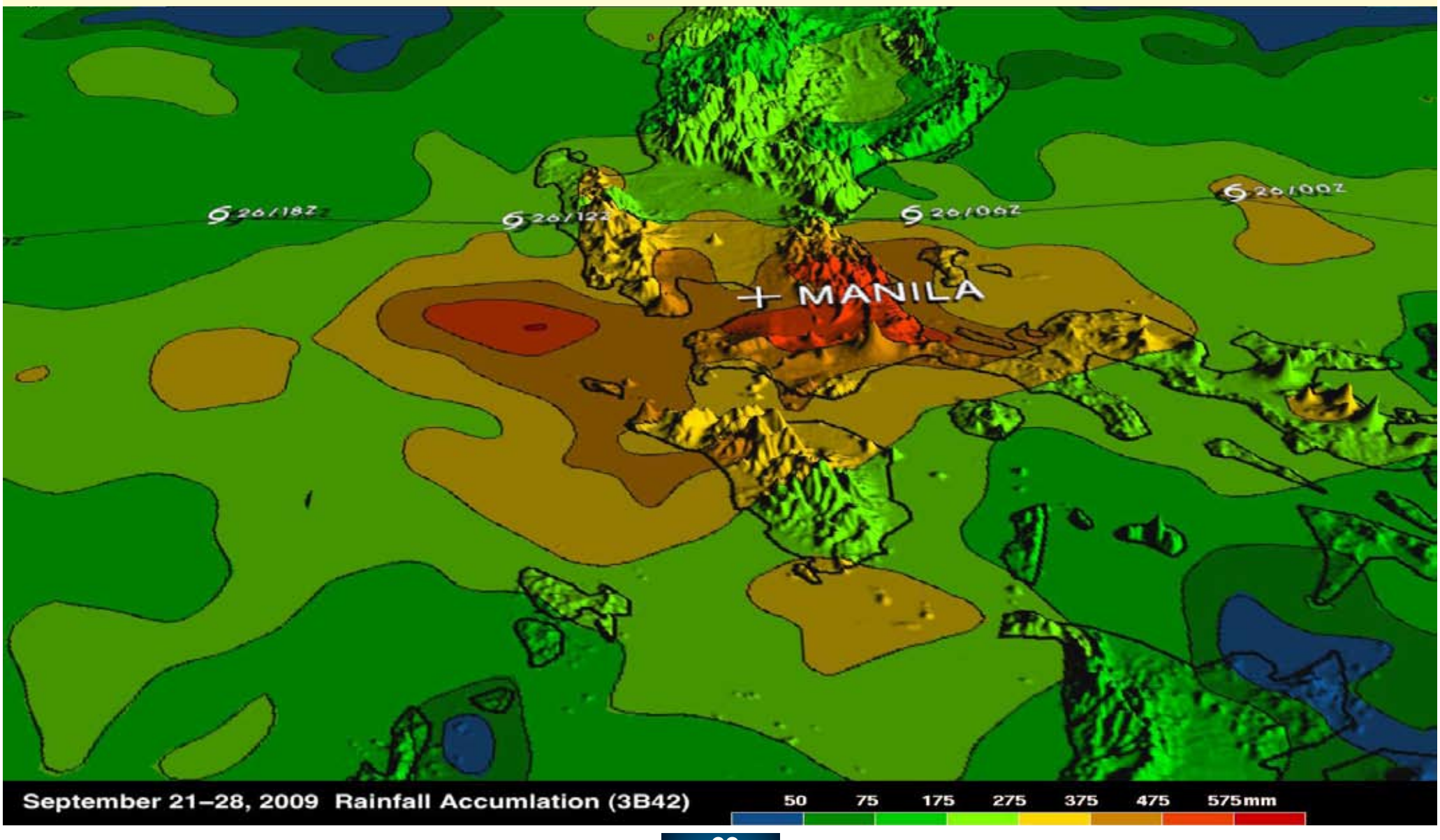


Figura 52 (arriba): Imagen, en falso color, del tifón Ketsana, captada por el sensor Vegetation, a bordo del satélite francés SPOT-5, el día 28 de septiembre de 2009 sobre el sur de China. En el momento de la toma de la imagen, el tifón se localizaba a 910 km, al sureste de la ciudad de Sanya, en la provincia china de Hainan y se desplazaba hacia el noroeste, a una velocidad de 20 km/h.
Fuente: VEGETATION Programme. Producido por VITO; http://www.vgt.vito.be/AShtml/c173_china_typhoon_ketsana.html

Figura 53 (abajo): El satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) mide el volumen de precipitaciones provocadas por huracanes y tifones. En la imagen inferior se observa un mapa tridimensional sobre la zona de Manila y sus inmediaciones en el que se representa, mediante una gama de colores, el volumen acumulado de lluvia, registrado durante el periodo comprendido entre el 21 y el 28 de septiembre de 2009. Como puede apreciarse, en la capital filipina se recogieron por encima de 575 mm en una semana (zonas coloreadas en rojo intenso).
Fuente: http://www.nasa.gov/images/content/390538main_20091001_Ketsana-TRMM_full.jpg



5.1.2. VOLCANES

Los volcanes son elementos del relieve que ponen en comunicación la superficie terrestre con la parte superior del manto, a través de los cuales sale el magma, que es una mezcla de silicatos fundidos y elementos volátiles (CO_2, agua, etc.), que se encuentra a temperaturas que oscilan entre 700ºC y 1500ºC.

Los volcanes, junto con los terremotos, son los principales agentes geológicos internos que tienen los siguientes efectos:

1. Petrológico, a través del cual se forman rocas magmáticas.
2. Topográfico, por el que se generan relieves.

Los volcanes son estructuras geológicas, con forma cónica, más o menos extensas, generalmente de dimensiones kilométricas y que pueden alcanzar una altura variable, desde unos cientos de metros hasta varios kilómetros.

La estructura fundamental de un volcán típico (estratovolcán) es la siguiente:

1. Cámara magmática, que constituye la reserva de magma.
2. Chimenea: es el conducto que comunica la cámara magmática con el exterior.
3. Cráter, es la fractura o depresión de la superficie terrestre en la que termina la chimenea y el volcán.

Los volcanes pueden presentar conos, cráteres y chimeneas adventicias o secundarias. Los episodios de actividad volcánica se denominan erupciones y pueden ser más o menos violentos y acontecer de forma ocasional o continuada.

Las sucesivas erupciones volcánicas forman estratos de materiales volcánicos que se disponen de forma paralela y que contribuyen al crecimiento en altura y extensión de su estructura.

Los productos expulsados por los volcanes son muy variados y pueden ser:

1. Sólidos: productos piroclásticos, de mayor o menor tamaño, desde bombas volcánicas, de dimensiones métricas, a lapillo, de dimensiones centimétricas o milimétricas y cenizas.
2. Líquidos: coladas que son grandes masas de lava (se han perdido los componentes gaseosos) que discurren como ríos siguiendo la pendiente del terreno. El enfriamiento aumenta la viscosidad de la lava hasta que la colada se detiene.
3. Gaseosos: vapor de agua, dióxido de carbono, etc.

Según su estructura externa, los volcanes pueden ser:

1. Escudo volcánico. Tienen forma de cono rebajado con pendientes suaves y se forman a partir de lavas muy fluidas que se derraman y fluyen desde la depresión que forma el cráter. Los volcanes de las islas Hawai son de este tipo, por ejemplo, Mauna Loa y Kilauea.
2. Estratovolcán o volcán compuesto. Tienen forma de cono con pendientes más acusadas en las que se alternan coladas de lava con capas de productos piroclásticos (cenizas, etc). Se forman a partir de lavas más viscosas. Algunos ejemplos de este tipo de volcanes son el Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), el Etna, en la isla de Sicilia (Italia), el Teide, en las islas Canarias (España) y el Fuji (Japón).
3. Caldera volcánica. Estructura volcánica de grandes dimensiones (el cráter mide más de un kilómetro) formada por el hundimiento del techo de una cámara magmática o a partir de escudos volcánicos. Algunos ejemplos son la caldera de Aniakchak, en Alaska, la caldera de las Cañadas del Teide (España) y la caldera de Taburiente, en la isla de la Palma (España),
4. Cono de escorias. Tienen forma cónica, sus dimensiones son inferiores y está formado por productos piroclásticos, exclusivamente.
5. Domo. Estructura rocosa que se consolida en el cráter o en la chimenea de un volcán a partir de lava muy viscosa.

Según su actividad o según las características de las erupciones, los volcanes se agrupan, de acuerdo a los siguientes modelos:

1. Modelo islandés. Las erupciones se producen a través de fisuras en el terreno. Son erupciones tranquilas y las lavas que se producen son muy fluidas y recubren amplias extensiones. Este tipo de erupciones es poco frecuente, en la actualidad, en la superficie terrestre y más frecuente en zonas de dorsal, sobre todo submarinas.
2. Modelo hawaiano. Las erupciones se producen a través de escudos volcánicos. Son tranquilas, sin explosiones y las lavas que se producen son muy fluidas y forman coladas muy extensas. Algunos ejemplos de volcanes que producen erupciones de este tipo son el Maula Loa y el Kilauea (islas Hawai).
3. Modelo estromboliano. Las erupciones se producen a través de estratovolcanes y de conos de escorias. Son algo menos tranquilas que las anteriores y se pueden observan algunas explosiones. Las coladas de lava se alternan con erupciones de abundantes productos piroclásticos. Algunos ejemplos de volcanes que producen este tipo de erupciones son el Stromboli, en las islas Lipari, próximas a Sicilia (Italia) o el Teide (España).
4. Modelo vulcaniano o vesubiano. Las erupciones se producen a través de estratovolcanes pero, en este caso, son más violentas y con explosiones más abundantes y las lavas que se producen son más viscosas. También se pueden formar nubes de ceniza. Algunos ejemplos de volcanes que producen este tipo de erupciones son el Vulcano, en las islas Lipari (Italia), el Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), el Etna en la isla de Sicilia (Italia) o el Teide (España).
5. Modelo peleano o krakatoano. Las erupciones se producen en estratovolcanes, son muy violentas y con frecuentes explosiones, las lavas son muy viscosas y se pueden formar domos que pueden taponar la chimenea y el cráter del volcán y explotar posteriormente. También se pueden formar nubes ardientes. Algunos ejemplos de volcanes que producen erupciones de este tipo son Mont Pelee, en la isla Martinica (Antillas francesas) y Krakatoa (Indonesia).

El Índice de Explosividad Volcánica (IEV) es una escala de 8 grados que se utiliza para medir la magnitud de una erupción volcánica. El índice resulta de la combinación de varios factores como son el volumen total de los productos expulsados por el volcán, la altura alcanzada por las nubes de origen volcánico y la duración de la erupción.

Las erupciones volcánicas no son predecibles. A veces, están precedidas por la aparición de pequeñas grietas y fallas en el terreno, por pequeñas explosiones en el cráter, terremotos de baja intensidad, aumento en las emisiones de gases y de los fenómenos hidrotermales o por variaciones locales del campo pero no hay una relación causa – efecto clara.

Las erupciones volcánicas se producen, en último lugar, por el aumento de la presión y la temperatura en la cámara magmática. La magnitud de las erupciones volcánicas está relacionada con el pH de las lavas. Una lava ácida es más viscosa y más explosiva mientras que una lava básica es menos viscosa y menos explosiva. El aumento de la viscosidad supone un aumento de la peligrosidad ya que se dificulta la salida del magma y se origina un vulcanismo más explosivo. Las lavas básicas liberan, más fácilmente, los gases y, por tanto, explosionan menos y vencen, más fácilmente, las resistencias que pudieran aparecer en su recorrido por la chimenea volcánica. Las lavas básicas fluyen mejor que las lavas ácidas y pueden hacerlo de forma más continuada.

La mayor parte de los volcanes activos en el planeta son submarinos y resulta curioso observar la coincidencia entre la situación de los volcanes activos y la localización de las zonas de actividad sísmica más notable y de los terremotos, así como la coincidencia con los bordes de las placas litosféricas (figura 51).

Los riesgos volcánicos se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios están asociados directamente con las erupciones volcánicas mientras que los secundarios están asociados a procesos volcánicos aunque no están producidos por ellos.

Los principales riesgos volcánicos primarios son los siguientes:

1. Coladas y lluvias de piroclastos que son masas de rocas, fragmentos y cenizas que son arrojadas a altas velocidades y temperaturas y que tienen gran poder destructivo. El riesgo aumenta en función del

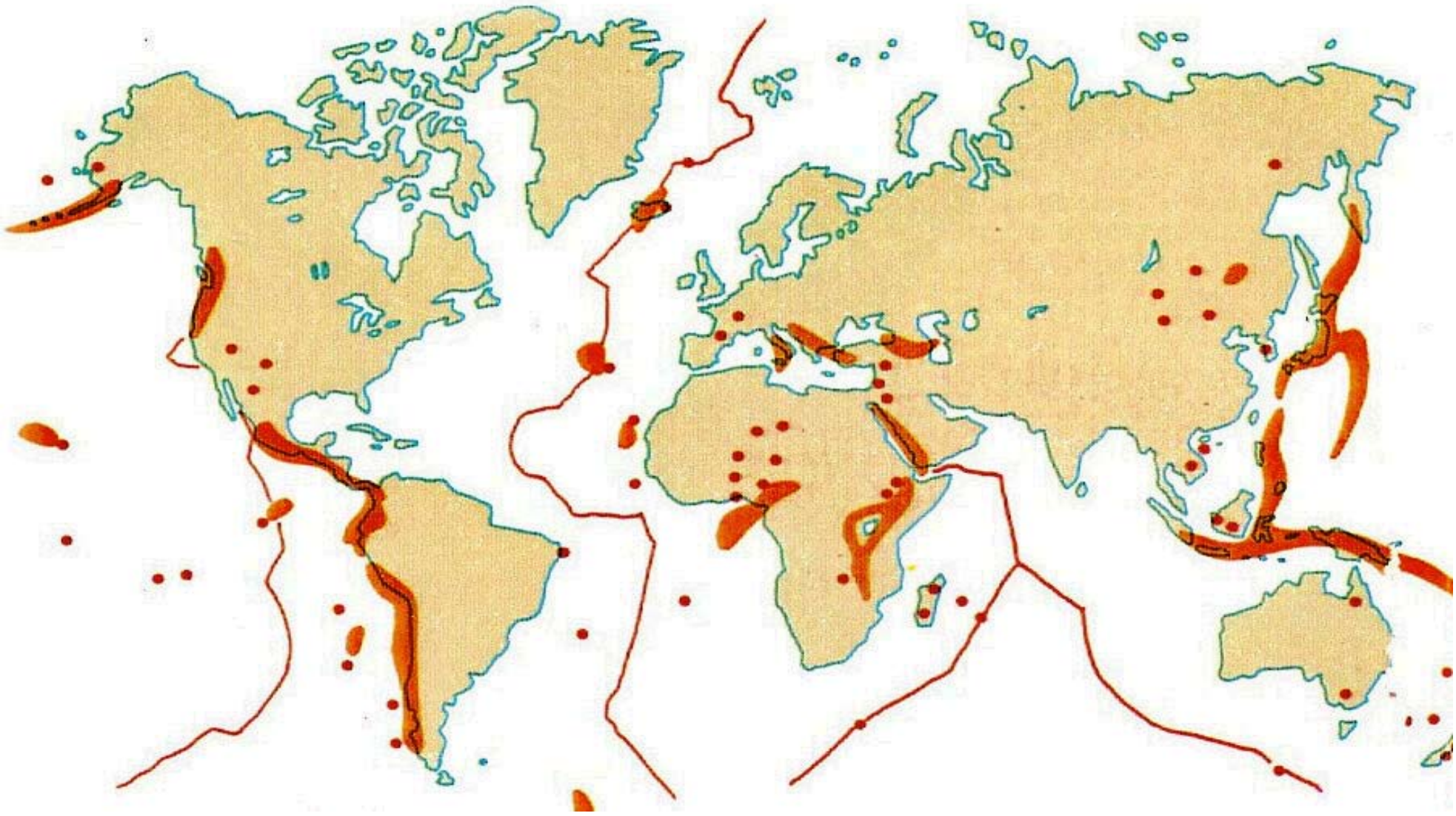


Figura 54: Distribución de los cinturones de fuego en el mundo. Las manchas de color naranja representan las zonas de mayor actividad sísmica en el mundo, asociadas a la tectónica de placas. Son zonas de subducción. Las líneas se corresponden con las dorsales oceánicas, áreas donde se crea corteza. Ambas contienen la mayoría de los volcanes en el mundo (puntos rojos).
Fuente: Atlas El País-Aguilar

tamaño de los fragmentos arrojados. Las cenizas plantean problemas de visibilidad y producen problemas respiratorios.
2. Coladas de lava que pueden descender más rápidamente en función de su baja viscosidad. La lava inutiliza el terreno por muchos años y su recuperación depende del clima.
3. Emisiones de gases que, generalmente, se liberan lentamente. El peligro aumenta cuando se acumulan y liberan repentinamente. Hay que tener en cuenta la toxicidad de las emisiones.

Los principales riesgos volcánicos secundarios son los siguientes:

1. Lahares o coladas de barro muy denso y veloz (hasta 100 km/h) que se producen en zonas con nieve o hielo o si las cenizas se hinchan de agua.
2. Tsunamis u olas gigantes que, normalmente, están asociados a terremotos aunque también a erupciones importantes.

Algunas de las erupciones volcánicas más importantes acontecidas a lo largo de la historia son las siguientes:

1. Vesubio, en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), en el año 79 que sepultó las ciudades romanas de Pompeya y Herculano.
2. Tambora, en Indonesia, en el año 1815. La gran cantidad de cenizas emitidas pudieron afectar al clima de la zona.
3. Krakatoa, en Indonesia, en el año 1883, que se considera el mayor cataclismo de la historia. Produjo 36.800 víctimas mortales por la explosión del cráter y por los tsunamis posteriores.
4. Mont Pelee, en la isla Martinica de las Antillas francesas, en 1902. Produjo 30.000 víctimas mortales por nube ardiente.
5. Paricutin, en México, en 1943. Constituye la primera oportunidad de observar la aparición y desarrollo de un volcán en un terreno donde, anteriormente, no había indicios de vulcanismo.
6. Santa Helena, en EE.UU., en 1980. Se considera otra de las erupciones más violentas de la historia.
7. Pinatubo, en Filipinas, en 1991. Igualmente, es considerada como una de las erupciones más violentas y que, también, influyó en el clima de la zona.



Figura 55: Imagen tomada, con una cámara Hasselblad en color natural, por la tripulación del Space Shuttle el día 9 de abril de 2002 sobre el Monte Egmont. Se trata de un volcán que se encuentra al suroeste de la isla septentrional de Nueva Zelanda. Este nombre le fue asignado por el Capitán Cook.

Fuente: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory at Johnson Space Center. NASA-JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.





Figura 56: Imagen ASTER, en pseudocolor natural, tomada el 27 de mayo de 2001 sobre el monte Egmont o monte Taranaki, Nueva Zelanda.

Es un volcán inactivo situado en el Parque Nacional Egmont. Se encuentra en la isla Norte de Nueva Zelanda. Entró en erupción, por última vez, en el año 1755. La imagen muestra una llamativa forma circular que se corresponde con los límites del parque nacional, de unos 330 km², de extensión. En 1881 se inicia la protección y se acuerda que los límites estarán fijados por una circunferencia con un radio de 9,6 km desde la cumbre del volcán. El contraste entre el bosque lluvioso denso y las tierras de cultivo y pastizales que lo rodean es evidente, incluso desde el espacio. El volcán alcanza una altura de 2.518 m, cerca del mar de Tasmania, al oeste. En sus abruptas laderas se desarrolla una interesante sucesión de ecosistemas, desde zonas de bosque lluvioso (en verde oscuro) hasta las zonas de cumbres, cubiertas por nieve (en color blanco), pasando por ecosistemas arbustivos subalpinos y alpinos (en verde intenso rodeando la orla blanca del cono volcánico). La imagen cubre un área de más de 2000 km².

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 57 (arriba): Imagen captada por los astronautas de la Estación Espacial Internacional (ISS), el 8 de junio de 2006, con una cámara digital Kodak 760C y una lente de 800 mm. Enfocando hacia el sureste, la imagen muestra la caldera volcánica de las Cañadas, Tenerife, España. Sus límites se aprecian perfectamente rodeando al Teide, cuyo cono se encuentra en el centro de la caldera. Aún en junio, posee restos de nieve. Al SW del Teide, es decir a su derecha en la imagen, se encuentra otro cono volcánico, el Pico Viejo. La caldera tiene una superficie de 170 km² y se formó por el hundimiento del techo de una cámara magmática, posiblemente después de una erupción masiva. En el centro de la caldera se observan distintas coladas de lava, en tonos ocres, marrones y rojizos. Como ya se ha dicho, el Teide es un estratovolcán. Los flancos del cono están cubiertas por capas alternantes de densos flujos de lava y fragmentos rocosos expulsados durante las erupciones. Al norte, es decir, en la parte inferior de la imagen, en primer plano, pueden apreciarse las densas masas forestales de pino canario, en color verde oscuro.
Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

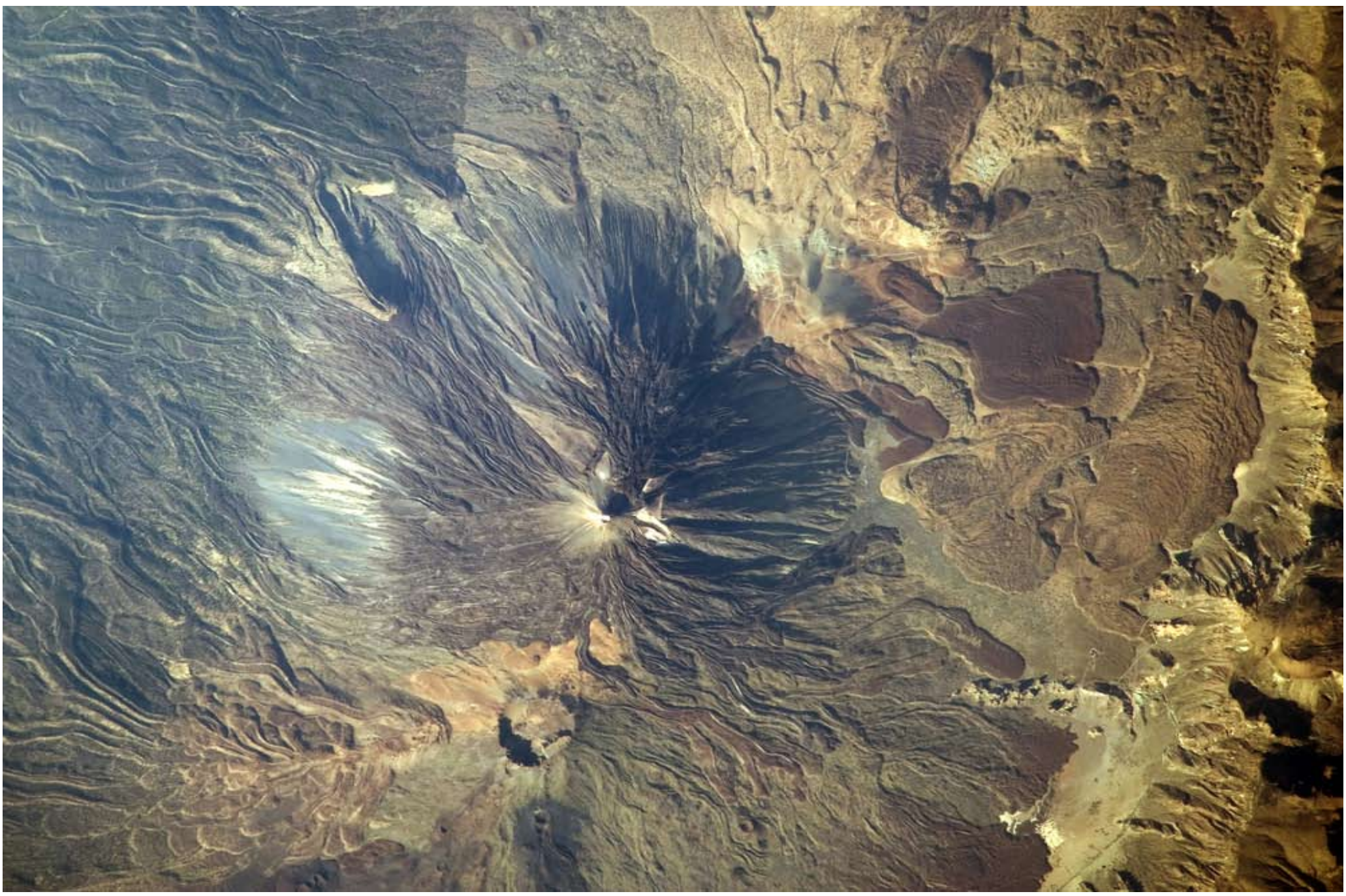




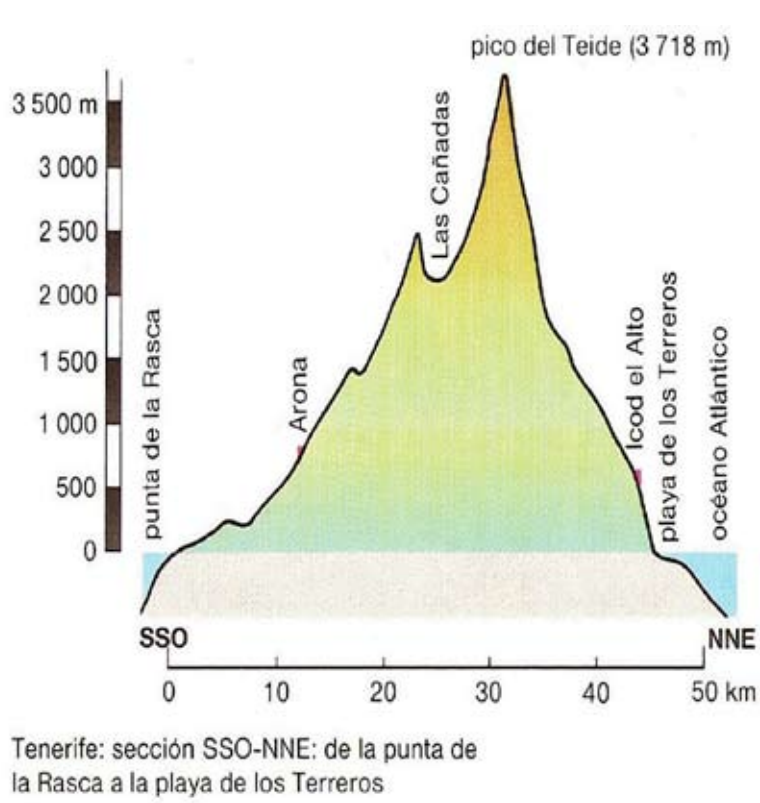
Figura 59 (arriba): Imagen de la isla de Tenerife, captada desde el Space Shuttle, el día 10 de noviembre de 1994.

El Teide es el pico de mayor altura de España (3.718 m) y se encuentra en la isla canaria de Tenerife, integrado en el Parque Nacional del mismo nombre. Las islas Canarias tienen un origen volcánico y su formación empieza hace 30 millones de años. La ultima erupción del Teide data del año 1909. Canarias es un archipiélago volcánico muy reciente. Sus grandes edificios volcánicos se apoyan sobre grandes bloques de la corteza oceánica. Las coladas de lavas originan un típico relieve volcánico.

Fuente: www.visibleearth.nasa.gov

Figura 58 (izquierda, en página anterior): Imagen captada desde la Estación Espacial Internacional (ISS), el 15 de julio de 2009, con una cámara digital Nikon D3 y una lente de 800 mm. La imagen muestra, igual que la figura anterior, la gran estructura volcánica conocida como la caldera de Las Cañadas, dentro de la cual se encuentran los dos estratovolcanes, el Teide y el Pico Viejo. De forma radial a ambos conos volcánicos se disponen, entrelazadamente, los flujos de lava que cubren las laderas de ambos edificios volcánicos. Son especialmente visibles en la imagen las coladas del Teide.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Tenerife: sección SSO-NNE: de la punta de la Rasca a la playa de los Terreros

Figura 60 (derecha): Corte topográfico de la isla de Tenerife, en dirección SSO-NNE, atravesando el Teide. Obsérvese el pronunciado desnivel de la isla, especialmente en la vertiente norte del Teide. En menos de 20 km, existe un desnivel de más de 3.700 m. En esta sección se aprecia, con claridad, la depresión que forma la caldera de Las Cañadas, en la vertiente meridional.

Fuente: Gran Atlas de España, Planeta, 1990

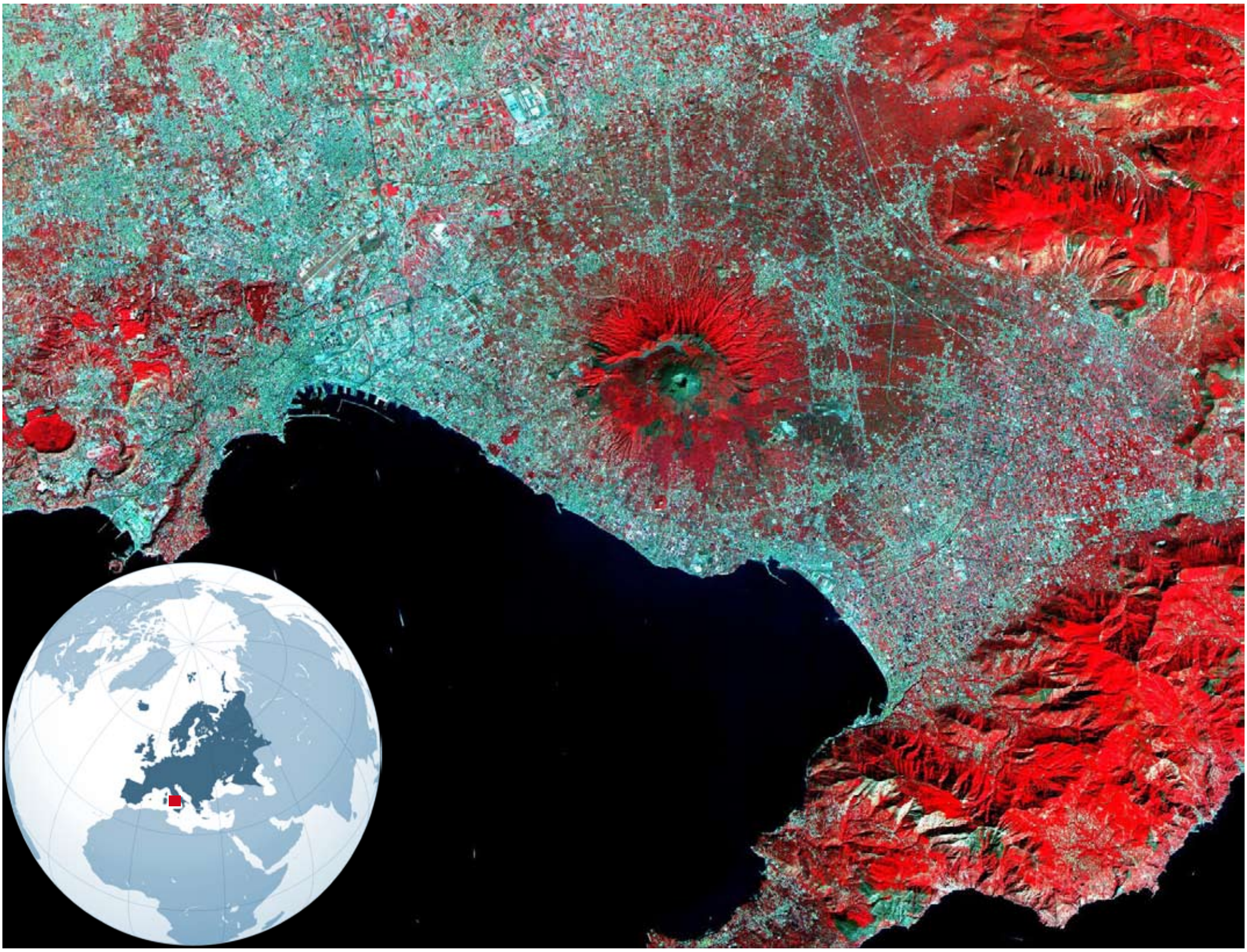


Figura 61 (arriba): Imagen ASTER, en falso color, del Vesubio y de la ciudad de Nápoles, adquirida el día 26 de septiembre de 2000. Uno de los factores de riesgo asociado a los volcanes es la existencia de núcleos de población e, incluso, de ciudades en sus inmediaciones. La imagen muestra el volcán Vesubio, que se encuentra en las proximidades de la ciudad de Nápoles (Italia), aunque abundan otros ejemplos similares por todo el mundo: Etna en Sicilia (Italia), Fuji en Japón o Popocatepetl en México.

En el centro de la imagen se observa la forma característica del cono volcánico del Vesubio, en color azul-verdoso, rodeado de una masa radioconcéntrica de vegetación (en color rojo) que cubre las laderas del volcán. Éste se alza dominando la bahía de Nápoles, en color negro en la parte inferior de la imagen, y sobre la península de Sorrento, en el sureste.

Cortesía de NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 62 (en página siguiente, arriba): Imagen adquirida por el radar de apertura sintética SIR-C/X-SAR desde el Space Shuttle Endeavour, el día 14 de abril de 1994. La escena está centrada en la región volcánica de Colombia, en la cordillera central andina, a unos 150 km. al oeste de Bogotá. Se visualiza el volcán Nevado del Ruiz (5.399 m.), con forma cónica en color rojo oscuro, algo más abajo y a la derecha del centro de la imagen.
El volcán Nevado del Tolima (5.215 m.), de pendientes más escarpadas, se localiza en la parte inferior izquierda de la imagen. El color rojo de las partes inferiores central y derecha se debe a la abundante cobertura de nieve y a la ausencia de vegetación. El Nevado del Ruiz está cubierto por glaciares. En noviembre de 1985, tras una violenta erupción, se originó un lahar. Como es sabido, este tipo de actividad volcánica es la que tiene uno de los efectos más catastróficos. Se trata de coladas de barro muy denso que discurren por las laderas de un volcán, generalmente estratovolcán, a gran velocidad. Aunque la actividad volcánica sea mínima, en un volcán basta muy poco calor para producir la fusión del hielo y la nieve. En esos casos, la gran cantidad de agua que desciende por las laderas del volcán arrasa ciudades, cultivos e infraestructuras, incrementando su poder destructivo cuando el agua arrastra materiales de erupciones anteriores. El lahar arrasó la ciudad de Armero, fuera de la imagen, a la derecha del Nevado del Ruiz, y produjo cerca de 25.000 víctimas mortales.

Fuente: NASA/JPL.

Figura 63 (en página siguiente, abajo): Imagen en falso color, captada por el satélite LANDSAT 7, en enero de 2001. En el centro de la imagen, bajo las nubes, se visualiza la caldera del volcán Pinatubo (1.739 m.), localizado al noroeste de Manila, en Filipinas. Tras 10 años de su última erupción, se observa que las laderas del volcán han sido, de nuevo, colonizadas por la vegetación, en color verde. Las cenizas y materiales expulsados se mezclaron con agua, dando lugar a densas coladas de barro (en colores violeta) que fluyeron hacia el Mar de China, fuera de la escena, en su lado izquierdo.

Cortesía: NASA/USGS/University of Hawaii

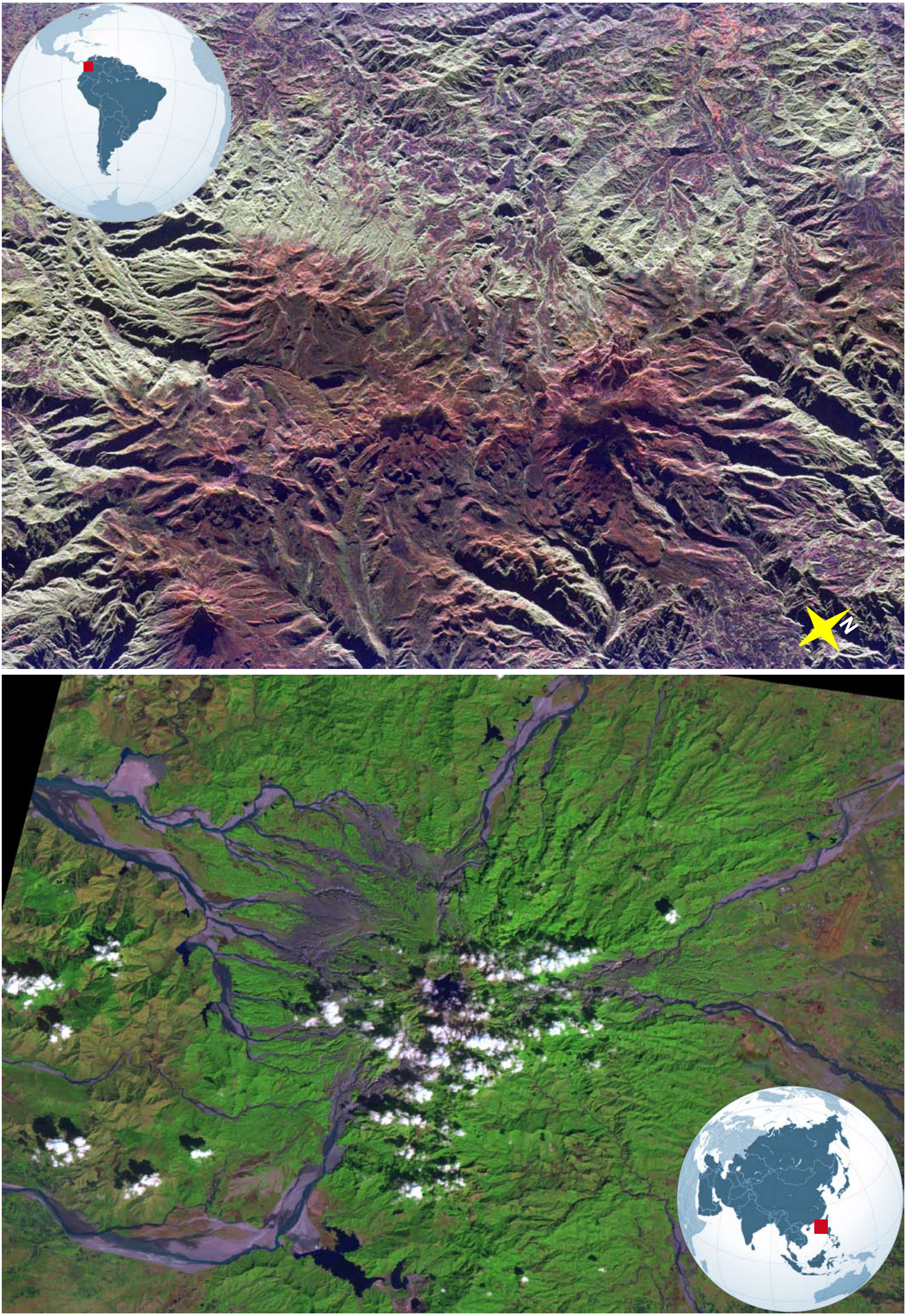

N



Figura 64: Imagen ASTER, en falso color, del volcán Chaitén, captada desde el satélite TERRA, el día 19 de enero de 2009.

Este volcán se encuentra en el sur de Chile, dominando el Golfo de Ancud, enfrente de la isla de Chiloé.
Tras 9.000 años de inactividad, el día 2 de mayo de 2008 el Chaitén entró en erupción. Durante los meses siguientes, el volcán mostró distintos signos de actividad, emitiendo densas plumas de vapor y de cenizas a la atmósfera que cubrieron la vegetación de las inmediaciones del cono y dificultaron el drenaje de las corrientes de agua, ocasionando inundaciones en la ciudad cercana del mismo nombre. El 19 de enero de 2009, una violenta explosión ocasionó el colapso de la bóveda del volcán. Una espesa nube de vapor y de cenizas se extendió hasta una distancia de 70 km., hacia el noreste del volcán. Se aprecia claramente esta nube, con un color blanco, que asciende desde la boca del cono, en el centro de la imagen, hasta la parte superior derecha de la misma. Al sureste del volcán, en sus proximidades, se aprecia una extensa mancha de color marrón. Se trata de la zona más afectada por la colada de barro y cenizas ocasionadas por la erupción. Sin embargo, en el extremo oriental de la imagen se aprecia una zona natural, menos afectada, con una combinación de colores gris, blanco y azul claro. Es una zona de suelo desnudo, vegetación alpina y glaciares (azul claro), distribuidos en distintos valles. Hacia el suroeste del volcán, el río Blanco transportó lahares hacia la ciudad, situada en su desembocadura. Los sedimentos arrastrados y depositados produjeron daños en una infraestructura portuaria y generaron turbidez en la bahía.

Cortesía de Jesse Allen, NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.





Figura 65: Imagen, en color natural, adquirida por Formosat-2, el día 19 de mayo de 2008.

Se observa la ciudad y la bahía de Chaitén, localizadas 10 km al suroeste del volcán del mismo nombre. Los 4.000 residentes de esta pequeña ciudad pesquera hubieron de ser desalojados como consecuencia de la erupción volcánica, de la caída de cenizas y del arrastre de lavas y coladas de barro a través de los ríos de las inmediaciones. El río Blanco llega a la ciudad, por el noreste. Desciende desde la ladera sur del volcán. La gran cantidad de materiales volcánicos arrastrados fueron depositados en el litoral, formando nuevos y espontáneos deltas que taponaron las infraestructuras portuarias. En la imagen se aprecia bien su magnitud, considerando que fue captada en un momento de bajamar. Parte de los materiales volcánicos y del fango atraviesan las calles de la ciudad, ocasionando daños materiales e inundaciones.

Cortesía del Dr. Cheng-Chien Liu (National Cheng-Kung University) y del Dr. An-Ming Wu (National Space Organization,Taiwan).

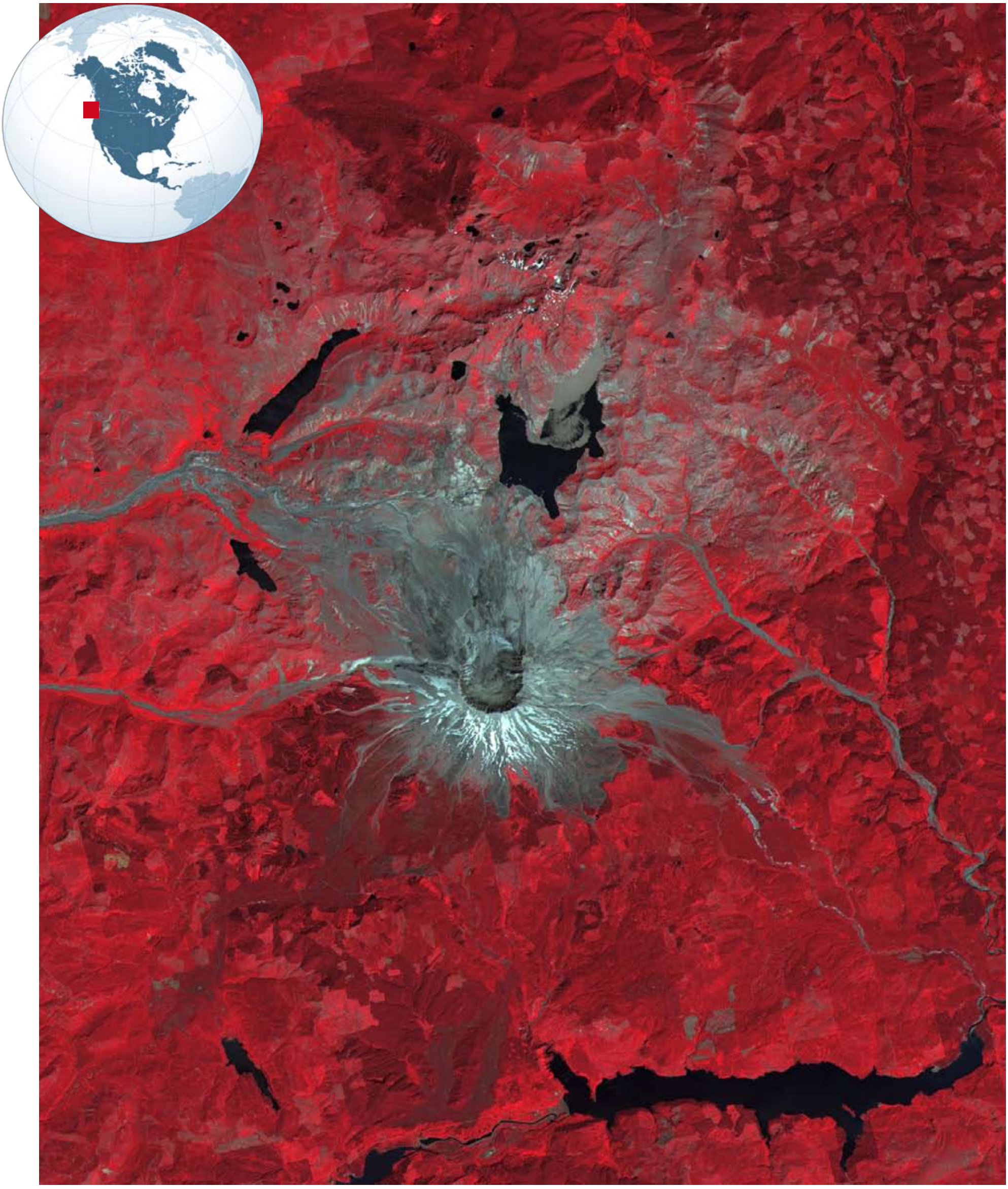


Figura 66: Imagen ASTER, en falso color, del Monte St. Helens, adquirida el día 8 de agosto de 2000.

La imagen muestra el estratovolcán Saint Helens que se localiza en el estado de Washington, al noroeste de Estados Unidos. Se encuentra a 154 km al sur de Seattle y a 85 km al noreste de Portland. El volcán entró en erupción el 18 de mayo de 1980, después de 123 años de inactividad. Constituyó una de las erupciones más catastróficas de la historia ya que alcanzó un grado 5 en la escala IEV, de 8 niveles. Ello supuso la expulsión de unos 4 km^3 de materiales. La chimenea estaba bloqueada en la parte superior del cráter. La presión del magma provocó el abombamiento y fractura de la ladera de la montaña. Un deslizamiento de tierras y el posterior colapso de la ladera norte liberó la presión de la lava. Este arrastre de materiales cambió la topografía del cono volcánico, provocando la reducción de la altura del mismo desde 2.950 m a 2.550 m. Asimismo, se produjo la emisión de grandes cantidades de cenizas y gases a altas temperaturas y un inmenso lahar que alcanzó el río Columbia y afectó a la ciudad de Portland. Actualmente el cráter tiene forma de herradura y mide 1,5 km de radio. Las cenizas afectaron a 11 estados del noroeste de EE.UU. y se extendieron por un área de 60.000 km^2. La erupción también produjo la muerte de 57 personas, miles de animales y daños en tierras de cultivo, granjas e infraestructuras en una superficie de 600 km^2. Los daños se estimaron, en un primer momento, entre 2.000 y 3.000 millones de dólares, cifra que aumentó a medida que se evaluaron otros efectos secundarios.

Fuente: METI/ERSDAC

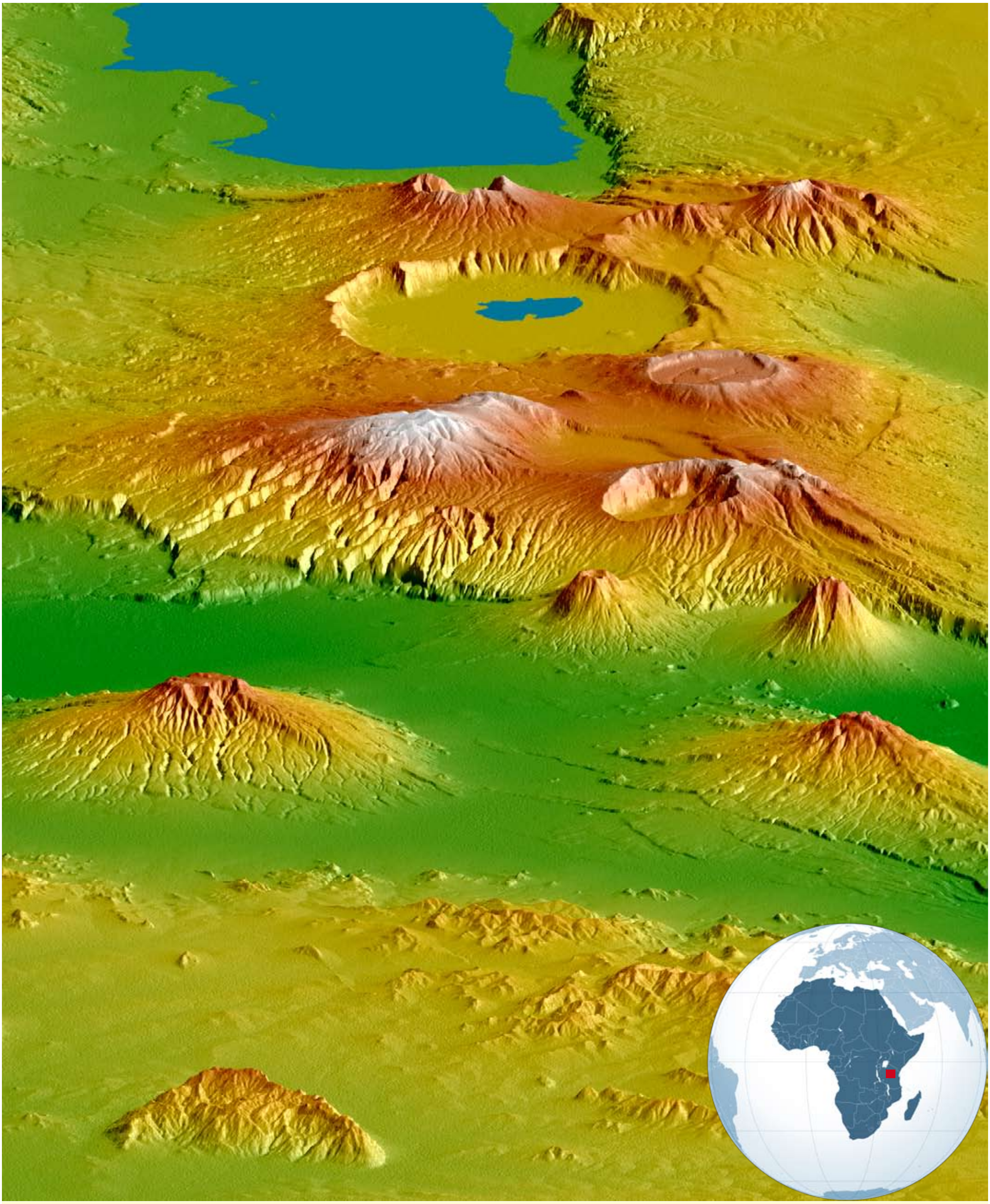


Figura 67: Imagen SRTM adquirida en febrero de 2000 desde el Space Shuttle. SRTM es un sensor activo, de tipo radar, que se montó en esta plataforma tripulada, en algunas misiones, con el objetivo de medir alturas. La imagen muestra una sección del Rift Valley oriental, en Tanzania. Está tomada desde el noreste hacia el suroeste, enfocando hacia el crater del Ngorongoro y el lago Eyasi, en color azul al fondo de la escena, en la parte superior de la imagen. Las tintas están asignadas por intervalos hipsométricos, desde los colores verdes de las zonas topográficamente más bajas hasta los sienas y blanco de las zonas más elevadas. Se ha empleado un sombreado para resaltar las zonas de mayor pendiente. La escala vertical se ha exagerado dos veces para reforzar la plasticidad del relieve. En el centro de la imagen, emergiendo sobre el rift o fractura transversal, se visualizan los montes Kitumbeine (a la izquierda) y Gelai (a la derecha). Entre el rift y el crater del Ngorongoro, se alza el Monte Loolmalasin, hasta los 3.648 m. En esta zona del continente africano interactúan distintos procesos como la tectónica de placas, el vulcanismo, los deslizamientos de laderas, la profunda erosión de las empinadas laderas de los volcanes y la deposición de materiales.

Cortesía de NASA/JPL/NGA Shuttle Radar Topography team

Figura 68 (arriba): Imagen MODIS, en color natural, adquirida desde el satélite TERRA sobre el Mediterráneo central. Uno de los efectos de las erupciones volcánicas que más perduran en el tiempo y que afectan a mayor superficie son las nubes de ceniza. La imagen muestra la columna de cenizas y materiales volcánicos que se emitió a la atmósfera el día 28 de octubre de 2002 tras una erupción del Etna (3.370 m.), localizado en Sicilia (Italia), el volcán más activo y grande de Europa. Se puede apreciar la considerable extensión que alcanza por el Mediterráneo centro-oriental. Los puntos rojos de la imagen, en la cara norte del volcán, representan los puntos calientes relacionados con la respuesta espectral, en el infrarrojo térmico, del magma y, probablemente, de un incendio forestal originado por la erupción. Fuente: MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC.

Figura 69 (abajo a la izquierda): Imagen MERIS captada el día 28 de octubre de 2002, el mismo día que la imagen anterior, desde el satélite europeo ENVISAT. Se estima que las cenizas y los materiales volcánicos fueron expedidos a una velocidad comprendida entre 350 y 450 m/s. La pluma de humo y cenizas se extendió hacia el sur y alcanzó la costa de África. Las partículas grandes de ceniza se dispersaron pronto. Sin embargo, otros aerosoles, producidos por el dióxido de sulfuro, persistieron durante varios años. Es conocido el impacto de este tipo de aerosoles sobre el cambio climático, tanto a escala regional como global. Al contener grafito y partículas de carbón, de color oscuro, absorben más luz solar, contribuyendo al calentamiento de la atmósfera. El sensor MERIS es idóneo para observar la distribución espacial de estos aerosoles y para evaluar su importancia e impacto sobre el ciclo del agua. Fuente: ESA.





Figura 71 (derecha): Imagen Landsat, en color natural, adquirida el día 11 de diciembre de 2001. Ha sido fusionada con un modelo digital de elevaciones, derivado de la imagen captada, desde el Space Shuttle, el día 11 de febrero de 2000, en el marco de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
Se observan los volcanes Nyamuragira (a la izquierda) y Nyiragongo (3.470 m), a la derecha que dominan el congolés lago Kivu y la ciudad de Goma, en el frente. El Nyiragongo entró en erupción el 17 de enero de 2002.
Fuente: NASA/JPL/NIMA

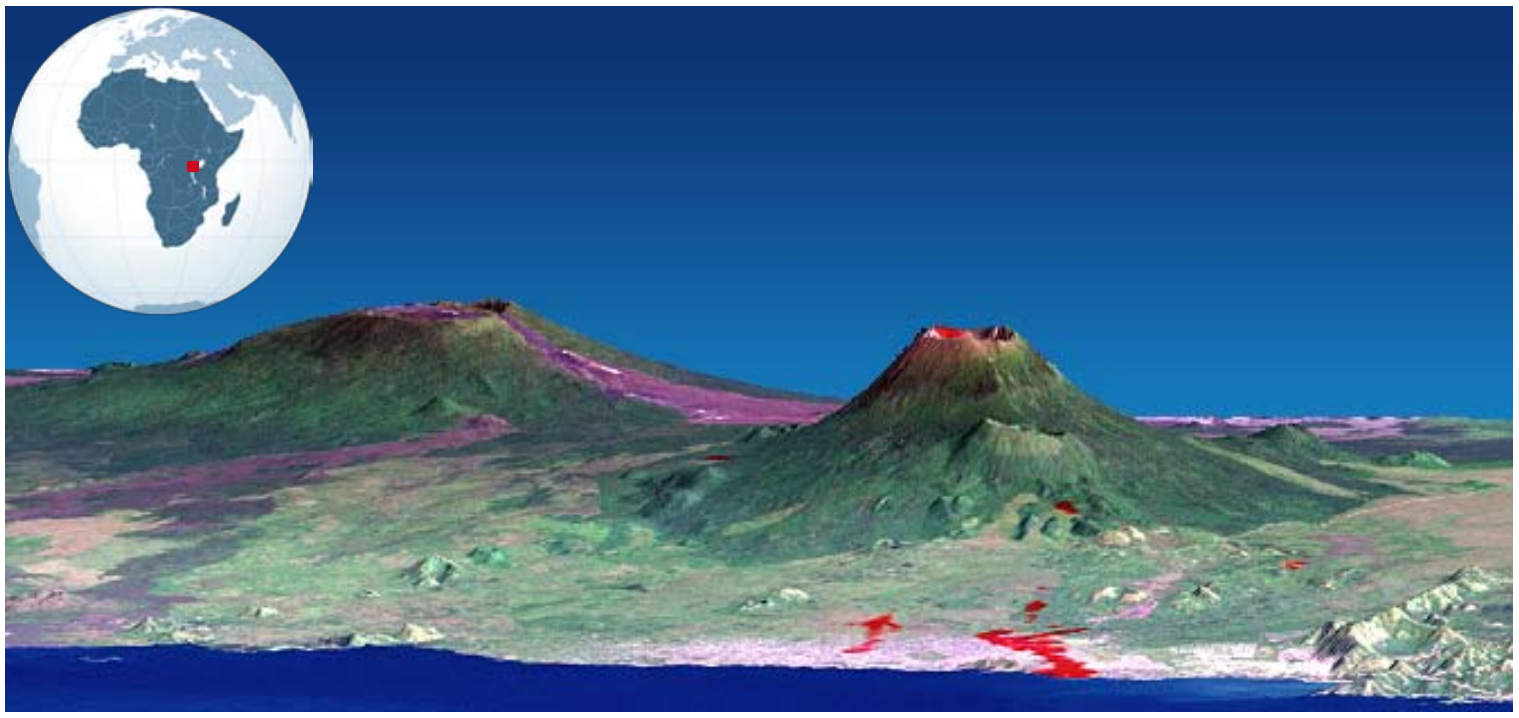




Figura 70 (página anterior, abajo a la derecha): Vista, en color natural, de la isla de Sicilia y de la erupción del volcán Etna, en octubre de 2002, desde la Estación Espacial Internacional.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 72 (arriba): Imagen QuickBird, captada el día 31 de octubre de 2002, sobre la erupción del Etna, Sicilia, Italia.

Fuente: www.digitalglobe.com

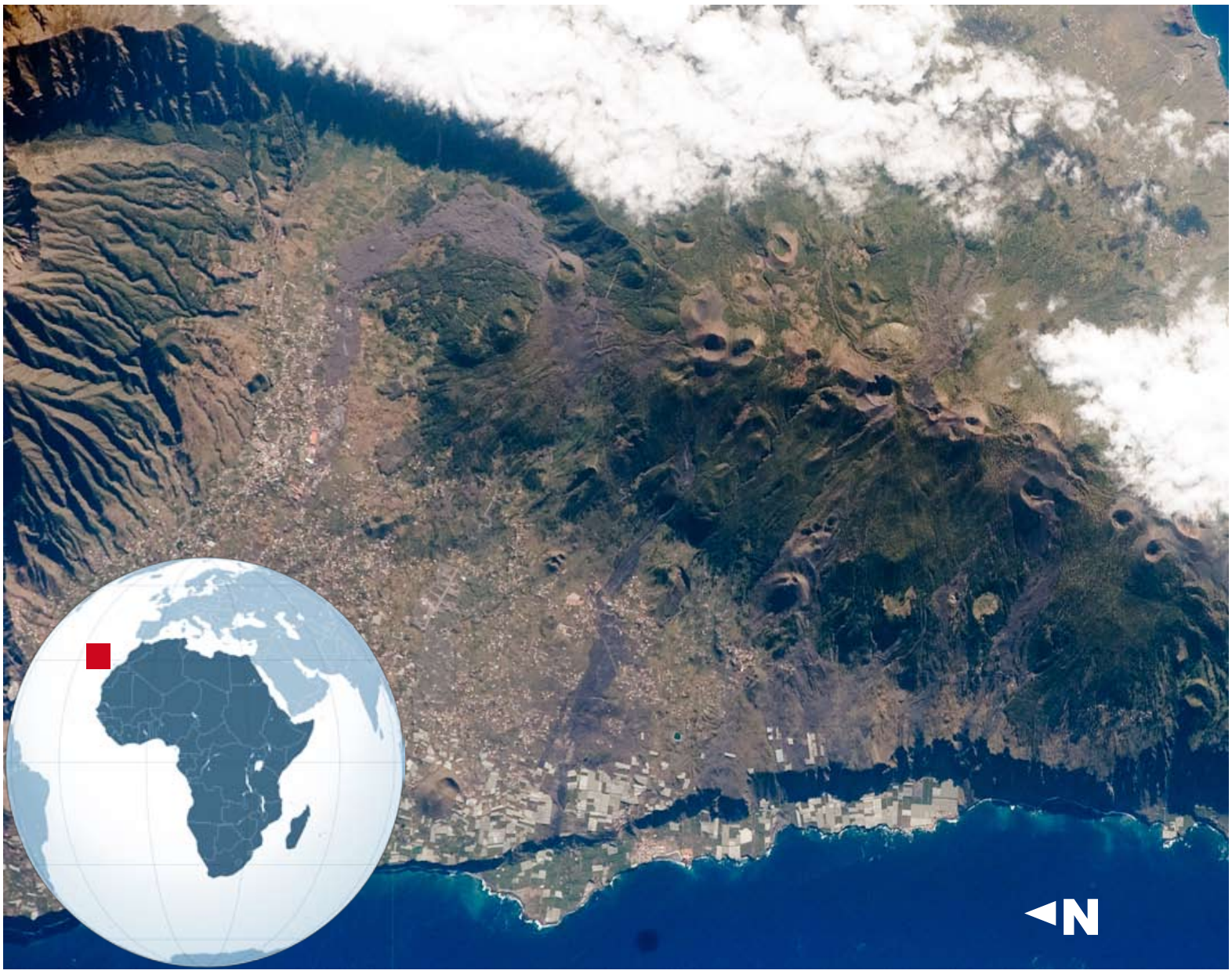


Figura 73: Fotografía, en color natural, de la isla de La Palma (Canarias, España), tomada por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional, el día 13 de mayo de 2008.

En la parte inferior derecha de la imagen, se observa la llamada Cumbre Vieja (1.949 m), una elevación alargada en sentido noreste-suroeste que presenta numerosas geoformas volcánicas. Llaman la atención los conos volcánicos y cráteres formados en la divisoria de esta zona montañosa. Asimismo, son visibles las coladas de lava (en colores grises y morados), que tapizan las laderas y partes bajas. En la zona central, se aprecia la planicie donde se localizan las localidades de El Paso y Los Llanos de Aridane.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 74: Volcán Kliuchevskaia (4.750 m), en plena erupción, fotografiado desde el transbordador Endeavour, en septiembre de 1994. Las cumbres de este volcán, situado a orillas del río Kamchatka en la península rusa de su mismo nombre, se encuentran nevadas. En la parte inferior derecha de la imagen se aprecia, nítidamente, la forma circular de otro cono volcánico.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

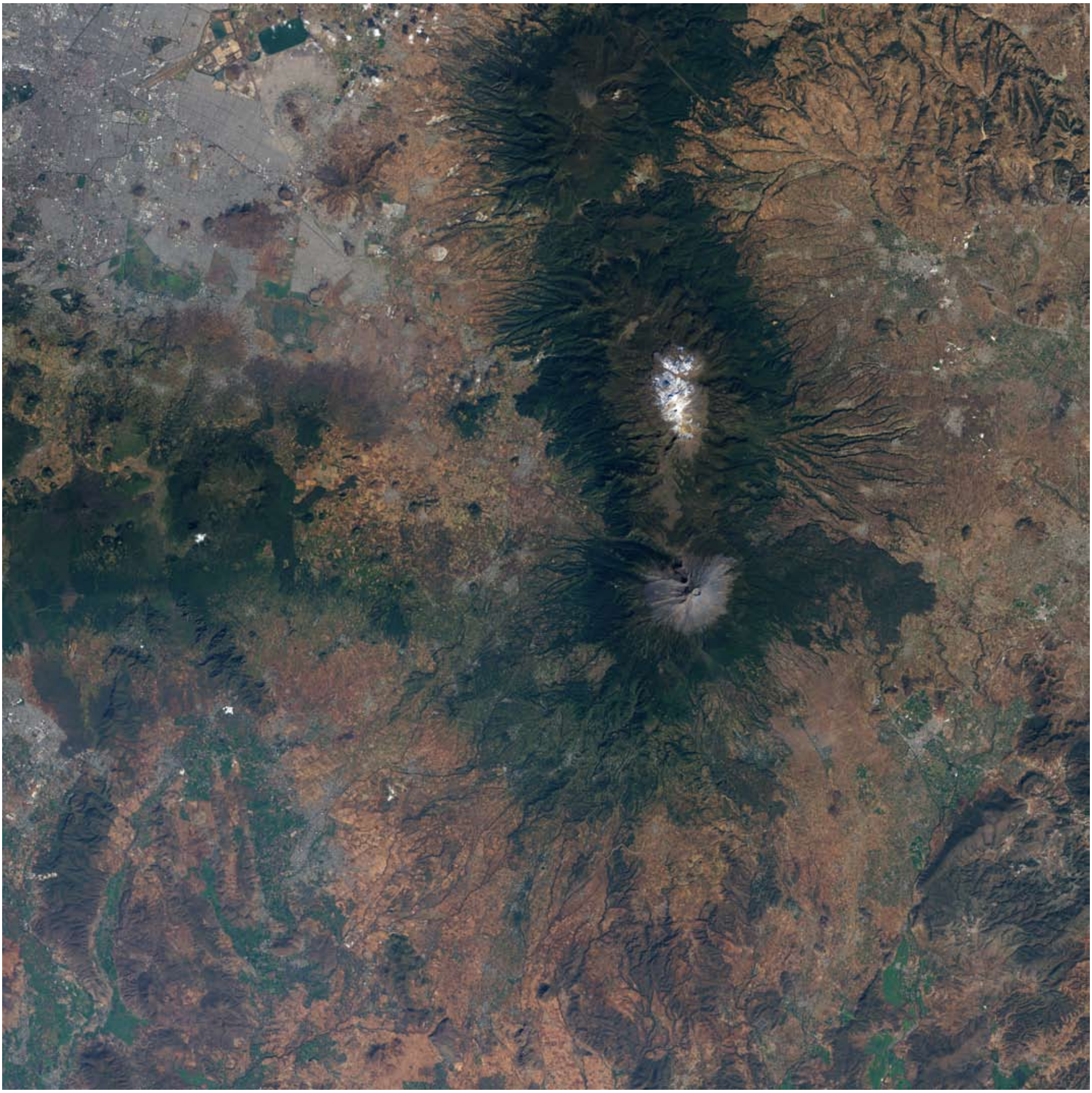




Figura 75: Imagen Landsat ETM+, en color natural, adquirida el día 4 de enero de 1999. En el centro de la imagen se aprecia el volcán Popocatepetl (5.465 m). Por encima del estrato arbóreo (mancha de color verde oscuro que tapiza parte de las laderas superiores), se observa una mancha circular de color gris que se corresponde con el nivel supraforestal, sin cobertura vegetal, cubierto de materiales volcánicos. En el centro de ella, destaca el cráter principal.

En la esquina superior izquierda de la imagen, a unos 65 km del Popocatepetl en dirección noroeste, se encuentra la megalópolis de Ciudad de México. Es destacable su color gris y su textura rugosa provocada por la heterogeneidad de los elementos urbanos, de naturalezas muy diversas.

La última actividad volcánica del Popocatepetl se registró el 18 de diciembre de 2000. Emitió a la atmósfera cenizas, humo y rocas volcánicas. Ante el riesgo de fusión de la nieve y el hielo y del deslizamiento de coladas de barro, las autoridades desalojaron a un sector de la población del valle de México con objeto de evitar una tragedia o, al menos, de mitigar su impacto.

La erupción más importante se registró en el año 800 de nuestra era. Las coladas de lava re-llenaron buena parte de los valles vecinos. Desde entonces, se han documentado otras cinco erupciones moderadas, dos de las cuales han ocurrido en el s.XX.

Cortesía de Ron Beck, EROS Data Center.



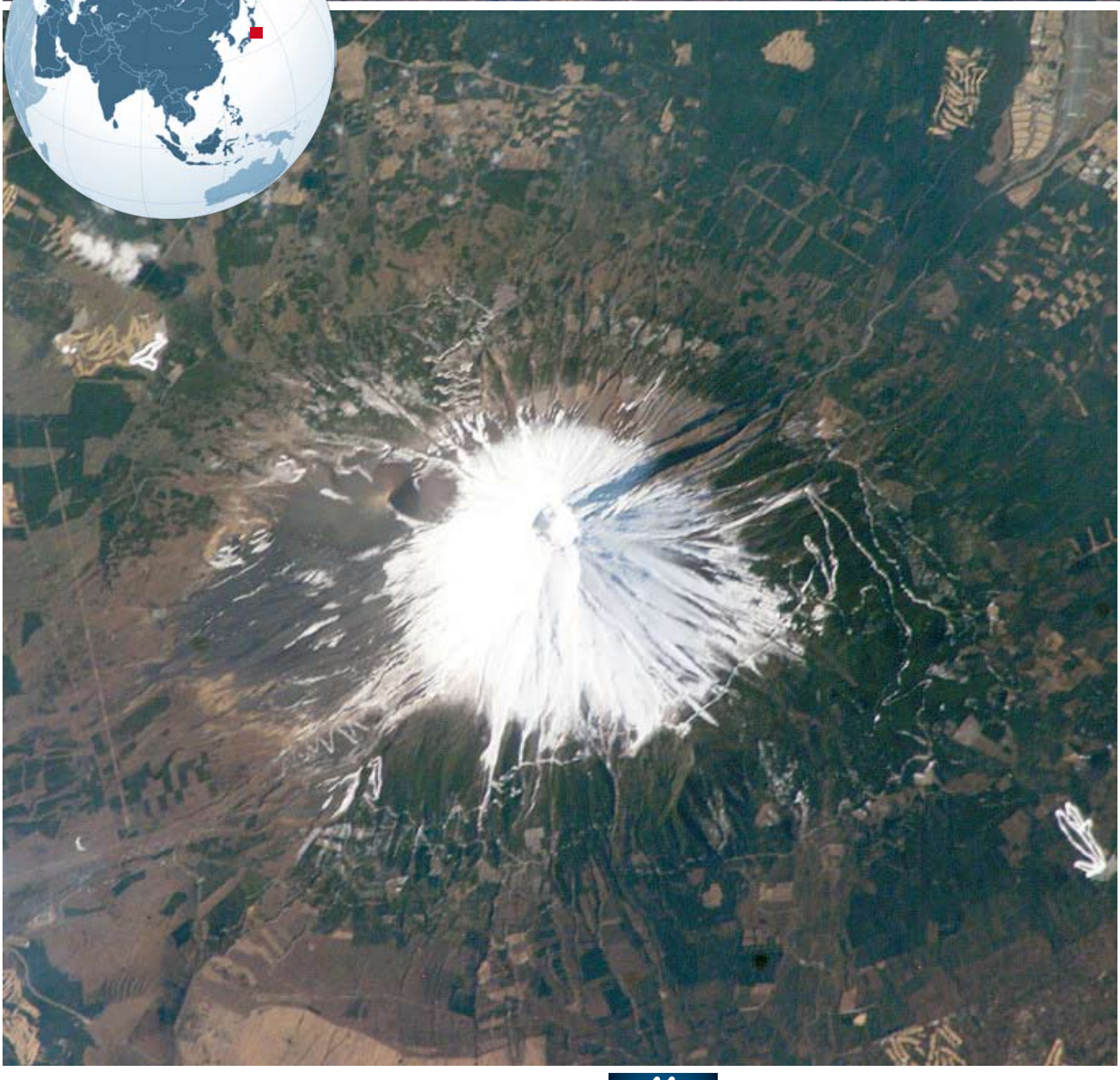


Figura 76 (arriba): Fotografía oblicua del Monte Fuji (3.776 m), en Japón. La imagen, en color natural, ha sido tomada el día 8 de abril de 2009 por los astronautas de la Estación Espacial Internacional. Se observa el manto de nieve, en color blanco, que cubre la parte superior del cono volcánico.

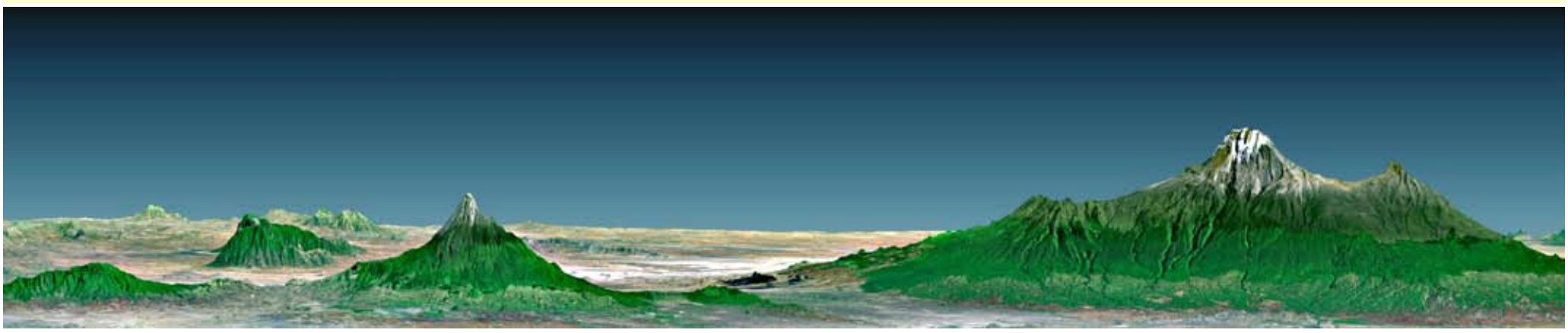
El Fuji es un ejemplo clásico de estratovolcán. Su perfil cónico y sus pendientes empinadas son el resultado de las continuas deposiciones de materiales volcánicos, coladas de lava y cenizas en sus laderas.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 77 (izquierda): Imagen, en color natural, sobre el Monte Fuji, Japón, tomada el 28 de febrero de 2004. Fuente: NASA

Figura 78 (arriba): Imagen en falso color adquirida el 21 de febrero de 2000 por el sensor ETM+, a bordo de Landsat 7. El Kilimanjaro (5.898 m) se aprecia en el extremo centro derecha de la imagen. Se ubica próximo a la frontera entre Tanzania y Kenia. El volcán se encuentra flanqueado por las llanuras del Parque Nacional Amboseli, al norte, y por las inclinadas tierras del Parque Nacional de Arusha, al sur y oeste.
Fuente: USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch.

Figura 79 (abajo): Perspectiva tridimensional resultante de la fusión de una imagen Landsat, en pseudocolor natural, adquirida el día 21 de febrero de 2000 y un modelo digital de elevaciones, derivado de la imagen captada, desde el Space Shuttle, en febrero de 2000, en el marco de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). El Kilimanjaro, a la derecha, es un conjunto de tres volcanes. Es el punto más alto de África. A pesar de estar situado a 330 km al sur del Ecuador, gracias a su altura, su cumbre posee nieves perpetuas. Está rodeado de otros volcanes.
Fuente: NASA/JPL/NIMA



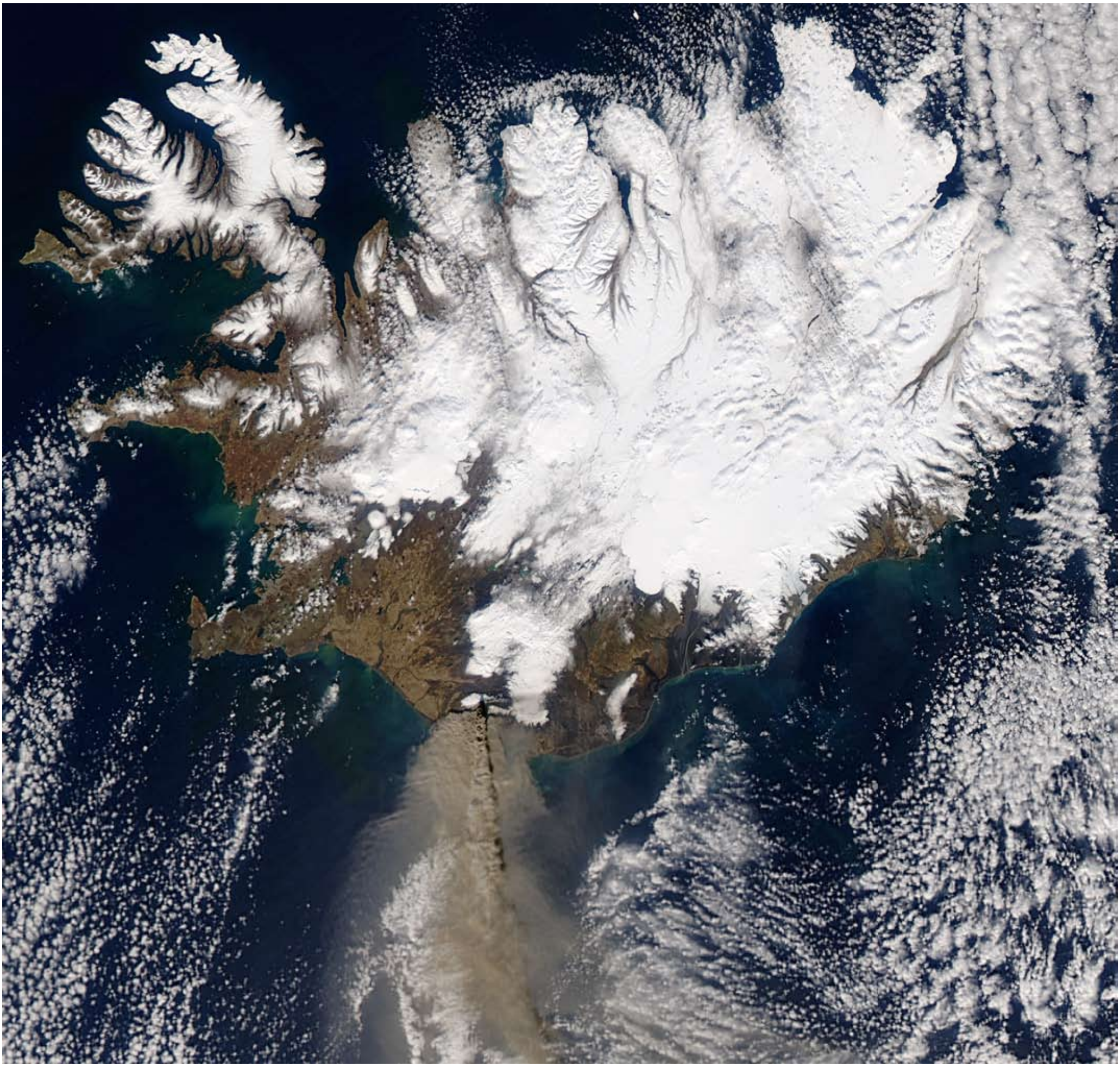




Figura 80: Imagen MODIS adquirida el 17 de abril de 2010 desde el satélite AQUA sobre Islandia.

En esta imagen se intuye la silueta de Islandia bajo el blanco manto de nieve y hielo y tras la rota cobertura nubosa. En el sur de la isla se observa la intensa pluma de cenizas volcánicas emitidas, desde el 20 de marzo de 2010, por el volcán Eyjafjallajökull. Las partículas volcánicas son expulsadas hasta una altura comprendida entre 5.000 y 8.000 m. En la imagen se diferencia una estrecha columna central de cenizas más compactas, con sombra negra, que se alza sobre la pluma más ancha y diluida que se encuentra debajo. Se piensa que esta columna central es fruto de un episodio eruptivo de tipo explosivo, más violento.

La densa nube volcánica se extendió hacia el sur y el este de Europa, impulsada por los vientos dominantes del oeste en estas latitudes, generando importantes complicaciones a la navegación aeronáutica. En el mes de abril de 2010 se cancelaron decenas de miles de vuelos como consecuencia de las medidas preventivas adoptadas por los organismos responsables del sector. Existen antecedentes en los que se han constatado averías en los motores de los aviones que han atravesado estas nubes volcánicas.

Cortesía de Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team.
http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/43000/43690/iceland_amo_2010107_lrg.jpg

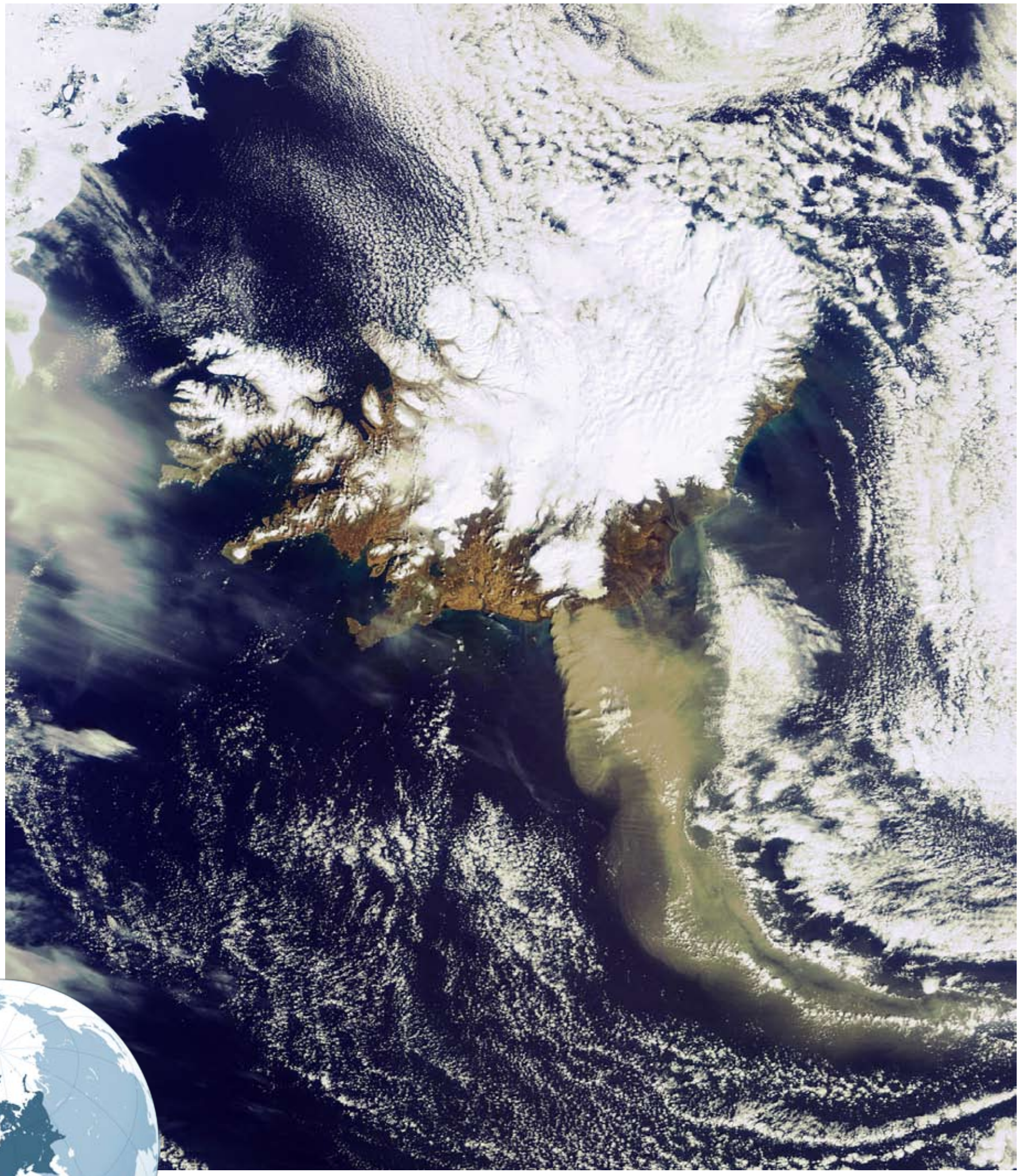






Figura 81 (arriba): Imagen MERIS tomada, en modo de máxima resolución espacial (300 m), el 19 de abril de 2010 por el satélite europeo ENVISAT sobre el volcán Eyjafjallajökull, Islandia.

En la imagen se observa, claramente, la gran pluma de cenizas volcánicas lanzadas a la atmósfera por el volcán. Desde el sur de Islandia, en el centro-norte de la imagen, cubierta por nieve y nubes (en color blanco), la nube de ceniza viaja hacia el sureste cubriendo el Reino Unido y buena parte de Centroeuropa. Se estima que la longitud de esta nube volcánica ha alcanzado los 400 km.

Fuente: ESA
http://www.esa.int/images/Volcano_Iceland_19-04-2010_H.jpg

Figura 82 (izquierda): Vista de la nube de humo y cenizas provocada por la erupción del Eyjafjallajökull.

Fuente: AP/Servicio de Guardacostas de Islandia

5.1.3. INUNDACIONES

Una inundación se produce cuando el agua ocupa una zona que habitualmente se encuentra libre de ella. Se trata de un fenómeno natural y recurrente aunque, en ocasiones, las actividades humanas son directamente responsables de estos episodios o los magnifican.

Las causas más frecuentes de la ocurrencia de inundaciones son:

1. Intensas y persistentes precipitaciones, durante un periodo determinado. Las intensas lluvias pueden estar asociadas a otros fenómenos meteorológicos que ocurren estacionalmente. Algunos ejemplos de estos eventos son la formación de gotas frías, en la región mediterránea, o la formación de huracanes, tifones o ciclones en la zona tropical o la sucesión de frentes fríos y de borrascas asociadas que recorren la zona templada. Cuando el suelo está saturado y no absorbe más agua, ésta escurre a lo largo de la cuenca, ocasionando el desbordamiento de los ríos y ramblas y, en algunos casos, el anegamiento de las zonas bajas litorales. En España es frecuente que se registren precipitaciones de 200 mm, e incluso superiores, en 24 horas. Así, por ejemplo, se registraron precipitaciones superiores a 800 mm en Jávea, el 2 de octubre de 1957, y en Oliva, el 3 de noviembre de 1987.
2. La subida anormal de las mareas o las elevaciones repentinas en el nivel del mar, provocadas por un tsunami. El ejemplo más reciente es el del tsunami de diciembre de 2004, ocasionado por un seísmo bajo el océano. La magnitud del mismo provocó la elevación repentina del nivel del mar y una ola de grandes dimensiones que asoló las zonas costeras de Indonesia y de otros países bañados por el Índico.
3. Los deshielos de primavera: cuando se funden la nieve y el hielo, el agua en estado líquido alimenta la escorrentía a lo largo de la cuenca. En algunos países, como Estados Unidos, las tormentas de primavera, junto al fenómeno del deshielo, ocasionan inundaciones.
4. Las coladas de barro que se forman cuando se mezclan los materiales volcánicos, tras una erupción, con el agua y nieve acumuladas en las laderas del cono. Según Echarri (2009), estas coladas fueron las responsables de las más de 23.000 víctimas ocasionadas por la erupción del Nevado del Ruiz, en Colombia, el 13 de noviembre de 1985.
5. La rotura de diques, balsas y represas. Estas infraestructuras están diseñadas para proporcionar una protección contra un cierto nivel de inundación calculada por los expertos. Sin embargo, en determinadas situaciones adversas relacionadas con intensas lluvias, estas barreras pueden fracturarse, ocasionando más daños que si no existieran. Éste fue el caso de la rotura de uno de los diques principales de la ciudad de Nueva Orleans como consecuencia de las fuertes lluvias asociadas a Katrina. En España, se recordarán los daños ambientales ocasionados por el vertido de residuos mineros metálicos sobre la cuenca del Guadiamar y en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, tras la rotura, en 1998, de la balsa de Aznalcóllar, con una capacidad de 8 hm^3. Este episodio está catalogado como una de las mayores catástrofes ambientales ocurridas en nuestro país. Asimismo, se recordará la rotura de la presa de Tous, en octubre de 1982, como consecuencia del incremento del caudal del Júcar, motivado por las intensas lluvias caídas asociadas a una gota fría. En esos días se registraron 600 mm de precipitaciones en un área de 700 km^2, en la cuenca media del Júcar. Tras el fallo del sistema de apertura de las compuertas del embalse, con una capacidad de 80 hm^3, se produjo la rotura de la presa. La crecida súbita causó importantes inundaciones y cuantiosas pérdidas aguas abajo. En Alcira se registró un caudal de 16.000 m^3/s.
6. Las dificultades de drenaje o infiltración del agua acumulada: algunas veces, los deslizamientos de laderas, ocasionados por las intensas precipitaciones, provocan la obstrucción del cauce formando diques espontáneos que retienen las aguas. Cuando la fuerza del agua rompe estos diques se produce una crecida súbita del caudal que causan graves inundaciones.
7. La construcción de nuevas áreas artificiales. Es posible observar la ocupación de las llanuras de inundación de ramblas, que habitualmente no llevan caudal permanente, e, incluso, de las corrientes permanentes. Se implantan determinados cultivos anuales y se construyen infraestructuras, equipamientos (cámpings) y hasta industrias o viviendas, en ocasiones ilegales, ocupando el dominio público hidráulico. Por otra parte, el incremento de las superficies artificiales en una cuenca como consecuencia de un intenso proceso de urbanización, por ejemplo, y los procesos de deforestación disminuyen la capacidad natural de absorción del agua por el suelo y el incremento de la escorrentía. Asimismo, aumenta el riesgo de erosión y el arrastre de materiales que son transportados en suspensión por las corrientes de agua, de manera que agravan el efecto de las inundaciones. Según Echarri (2009), la ocupación de los cauces por construcciones reduce la sección útil para evacuar el agua y reduce la capacidad de la llanura de inundación del río, de manera que las aguas crecen a un nivel más alto. Además, en estos lugares, el riesgo de pérdidas de vida es muy alto. Cuando se produce una crecida, el impacto sobre estas ocupaciones es evidente y se producen pérdidas cuantiosas. En otros casos, se realizan ocupaciones autorizadas por las propias administraciones, considerando que las actuaciones de restauración hidrológico-forestal y de mitigación de los impactos de potenciales inundaciones ofrecen seguridad. Éste fue el caso de la riada de Biescas (Huesca) que afectó, el 7 de agosto de 1996, al cámping de Las Nieves, instalado sobre el cono de deyección del torrente de Arás, en su desembocadura sobre el río Gállego. Una intensa tormenta ocasionó lluvias calculadas en 100 mm en tan sólo 10 minutos, en la cabecera del barranco. A pesar de que el bosque maduro de pinos, que cubre las laderas reforestadas a principios del s.XX, redujo la escorrentía, se estima que la riada alcanzó los 500 m^3/s, arrastrando una gran carga de rocas y troncos. Esta catástrofe produjo la muerte de 87 personas y heridas a otras 183.

Según un informe de Naciones Unidas, entre 1980 y 2000, las inundaciones produjeron unas 170.000 muertes en todo el mundo. Bangladesh e India son los países que tienen el número más elevado de personas expuestas en términos absolutos y relativos. Se trata de poblaciones que viven en zonas inundables en las llanuras aluviales y costeras. Casi 200 millones de personas, distribuidas en más de 90 países, están expuestas, anualmente, a inundaciones catastróficas.

En España, las inundaciones constituyen el riesgo natural más importante del país. Mateu y Camarasa (2000) han estudiado el problema de las inundaciones en España durante las dos últimas décadas del s.XX. A su vez, estos autores indican que el MOPU ha catalogado más de 2.400 episodios catastróficos durante los últimos 500 años, lo que significa una media de 4,9 inundaciones por cada 1.000 km^2 (Baltanás, 1999). Estos datos evidencian la gran vulnerabilidad histórica de la fachada mediterránea y, en concreto, de la cuenca del Segura. Ésta presenta una media de 11,2 inundaciones por 1.000 km^2 frente a las cuencas internas catalanas que rondan las 9,8 y la del Sur, que alcanzan los 9 episodios.

A juicio de estos autores, el incremento del riesgo en España obedece, fundamentalmente, a un aumento de la vulnerabilidad. La ocupación, cada vez más intensiva, de las zonas inundables se sucede desde fines del s. XIX. Desde entonces, se ha producido una enorme expansión urbana e industrial, fruto de un desarrollismo caótico y escasamente planificado. Las áreas metropolitanas de la mayor parte de nuestras ciudades constituyen un claro ejemplo de la invasión indiscriminada de vegas y llanuras fluviales. Esta ocupación apenas ha tenido en cuenta el riesgo de inundación y cuando lo ha hecho se ha limitado a intervenciones estructurales sobre los cauces para la defensa de emplazamientos inundables. Estas actuaciones de defensa han distorsionado la percepción del riesgo, creando un sentimiento falso de seguridad, amparado en la técnica, relajando la conciencia del peligro y animando a seguir ocupando las llanuras aluviales. Así pues, puede decirse que el hombre juega un doble papel ya que, por una parte, aumenta su exposición al peligro y, por otra, interviene en la dinámica fluvial, modificando las pautas hidrológicas naturales.

Aunque el fenómeno permanece latente, desde el punto de vista hidrológico destaca una menor recurrencia de las crecidas catastróficas desde mediados de los 60 y los 70.

En el Libro Blanco del Agua (Ministerio de Medio Ambiente, 1998) se han catalogado 1.036 áreas de riesgo, a nivel nacional. El mayor número de estas zonas se encuentra en la cuenca del Ebro (828), seguida de la del Júcar (132), la del Norte (123) y la del Guadalquivir (104). Si distinguimos entre diferentes grados de riesgo, las cuencas con mayor proporción de zonas de riesgo alto son las del Ebro (26,5%), Norte (23%) y Júcar (19,1%).



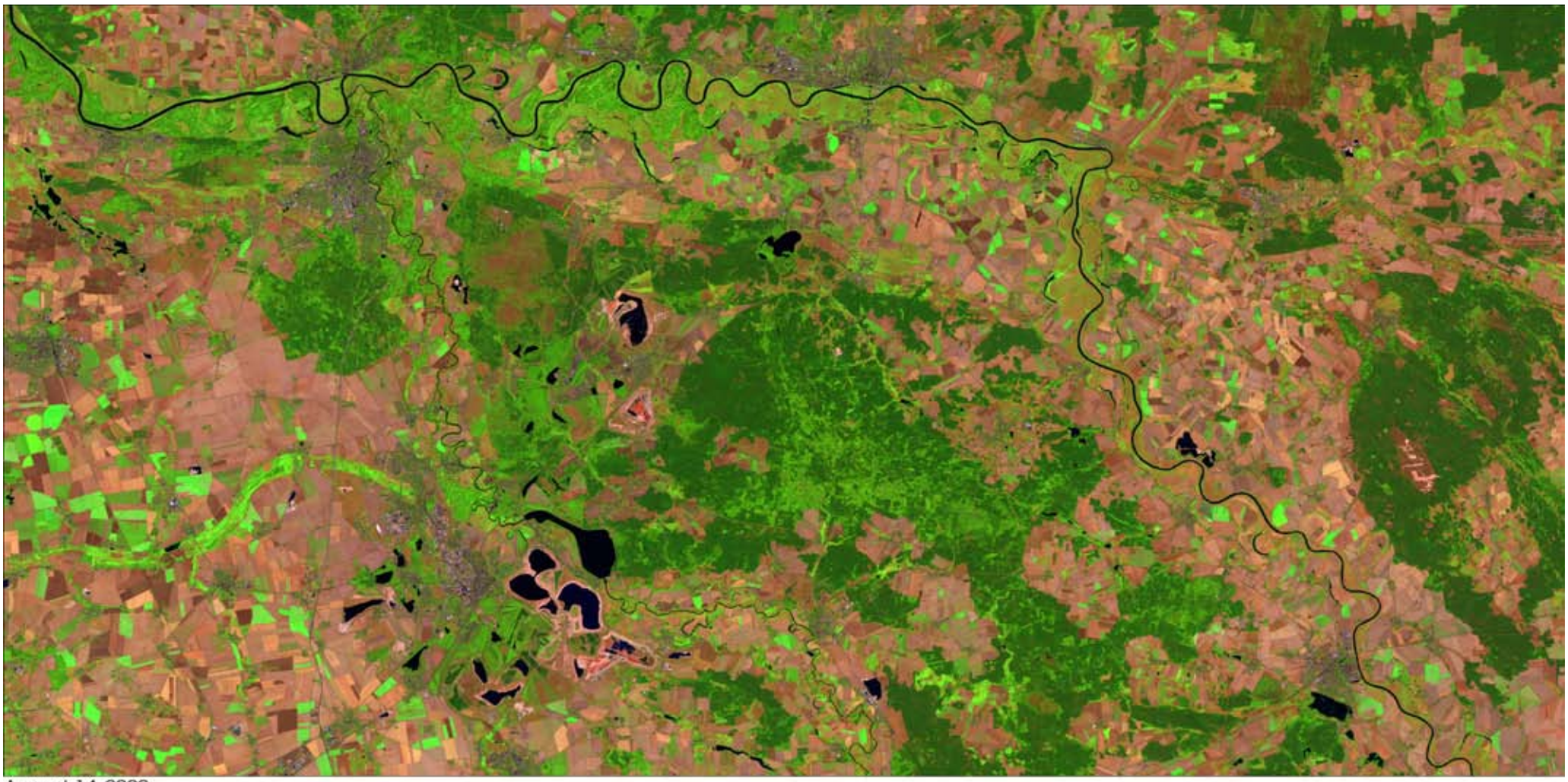
ISS005E10000



Figuras 83 (arriba) y 84 (abajo): Imágenes de las inundaciones provocadas por el Danubio, en las inmediaciones de la ciudad de Vac, situada unos 50 km al norte de Budapest. Ambas han sido captadas por los astronautas desde la Estación Espacial Internacional. La superior fue tomada el día 18 de agosto de 2002. Se observa cómo la lámina de agua estaba inundando numerosas parcelas agrícolas situadas en ambas márgenes del río y, especialmente, en la isla del centro de la imagen. Asimismo, la crecida amenazaba la ciudad de Vac, en la margen izquierda del río, al sureste de la imagen superior. La imagen inferior fue tomada el día 23 de agosto de 2002, cuando el caudal del río ya estaba descendiendo. Obsérvese que la orientación de las dos fotografías no es la misma.

Fuentes: http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop/photo.pl?mission=ISS005&roll=E&frame=10000 y http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop/photo.pl?mission=ISS005&roll=E&frame=10926





August 14, 2000



August 20, 2002

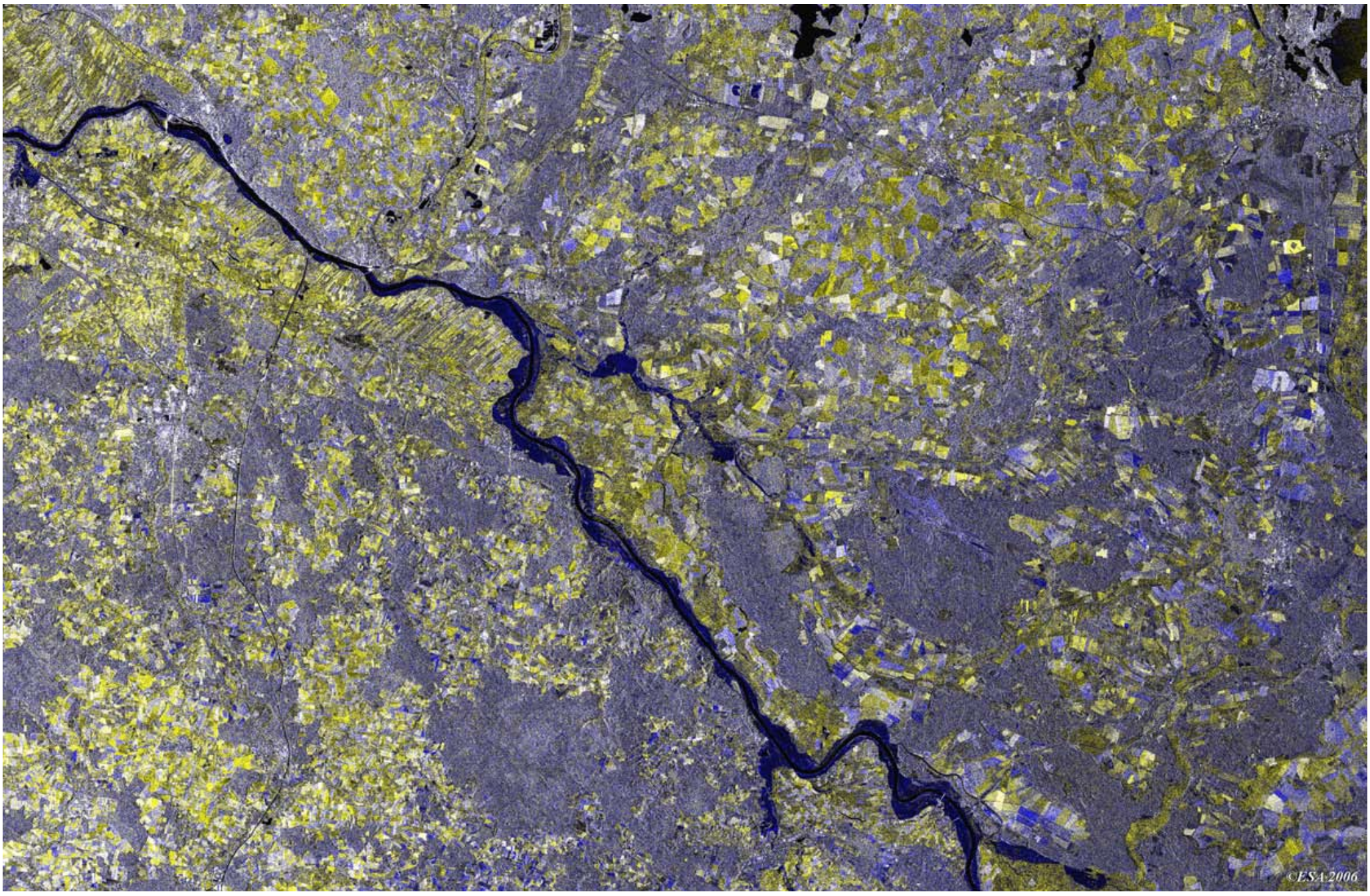
Figuras 85 (arriba) y 86 (abajo): Imágenes Landsat ETM+, en pseudocolor natural, tomadas desde Landsat-7 los días 14 de agosto de 2000 y 20 de agosto de 2002, respectivamente. Comparando ambas, se aprecia la extensa lámina de agua (en color negro) que cubre buena parte de las tierras agrícolas y forestales de ambas márgenes del río Elba, en el sector comprendido entre las ciudades alemanas de Wittenberg (en el centro norte de la imagen) y Dresde (en el sureste de la imagen).

Estas inundaciones se produjeron como consecuencia de las intensas y prolongadas lluvias que se iniciaron en el mes de agosto de 2002 y que afectaron a Europa Central y Oriental. En Dresde, la inundación amenazó el centro histórico de la ciudad y el nivel de agua alcanzó el récord anterior, registrado en 1845. En Praga el río Moldava, afluente del Elba, llegó al máximo histórico de 5.000 m^3/s inundando buena parte del centro histórico.

Decenas de miles de personas fueron evacuadas de sus hogares en Alemania. Se movilizaron 50.000 efectivos de los servicios de emergencia y de seguridad junto a 100.000 voluntarios que trabajaron para minimizar el impacto de las inundaciones sobre las zonas urbanas y otras infraestructuras vulnerables. Las inundaciones causaron 100 muertos en Alemania, República Checa, Austria, Hungría y Rusia y una pérdidas materiales estimadas de 20 billones de dólares.

Cortesía de Jesse Allen, NASA Earth Observatory;
Datos proporcionados por USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch.



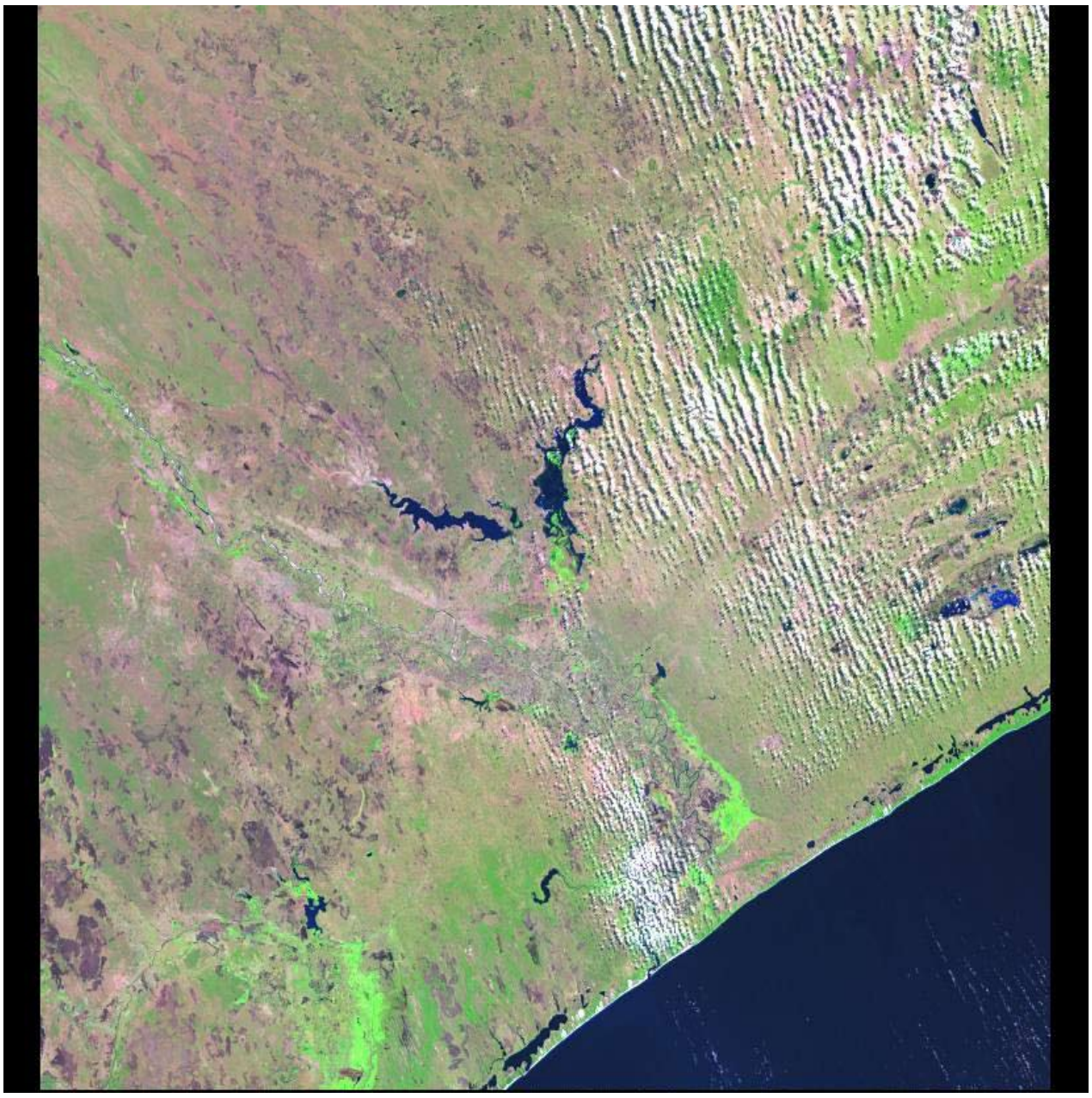




Figuras 87 (arriba) y 88 (abajo): La imagen superior es una composición multitemporal de dos imágenes rádar, captadas por ERS-2 los días 1 de julio de 2005 (antes de la inundación) y 7 de abril de 2006, días depués del desbordamiento del río Elba, ocasionado por las intensas lluvias y el deshielo. Se visualiza el área próxima a la ciudad alemana de Hitzacker, en la Baja Sajonia, situada unos 100 km al sureste de Hamburgo.

La figura inferior muestra un mapa topográfico en el que se ha superpuesto la lámina de agua ocasionada por el desbordamiento del río Elba, extrayéndola de la imagen ERS-2. La ciudad medieval de Hitzacker, situada en la confluencia del Elba y de su afluente, por la izquierda, en el cuadrante suroriental de la imagen y del mapa, estuvo seriamente amenazada por estas inundaciones. El día 2 de abril de 2006, el nivel del agua alcanzó 7,63 m, tres veces más del nivel habitual.

Fuentes: ESA y DLR/ESA



Figuras 89 (izquierda) y 90 (abajo): La figura izquierda es una imagen Landsat-TM, en pseudocolor natural, captada el 22 de agosto de 1999, seis meses antes de las inundaciones de Mozambique motivadas por el desbordamiento del río Limpopo.

La figura inferior es una composición multitemporal de dos imágenes radar, registradas, los días 16 y 27 de marzo de 2000, por el satélite ERS-1. Se aprecian las inundaciones ocasionadas por el río Limpopo, cerca de su desembocadura en el Océano Índico. Al tratarse de un sensor activo, las nubes no obstaculizan la visión de la lámina de agua, convirtiéndose en una herramienta eficaz para realizar una cartografía precisa del área afectada.

El río Limpopo tiene una cuenca de 413.000 km². La zona de captación de aguas, en la parte superior de la cuenca, se adentra en el desierto de Kalahari. La parte inferior está formada por ecosistemas más húmedos. A pesar de ello, después de la temporada lluviosa, las inundaciones son un problema esporádico en el tramo bajo del río. El desbordamiento más notable ocurrió en febrero de 2000, causado por las intensas lluvias caídas desde principios del mes y agravadas, más tarde, por la llegada del ciclón Eline. En la confluencia de los ríos Limpopo, que proviene del oeste, y Changane, que fluye desde el noreste, las aguas ocupan toda la llanura aluvial.

Fuentes: www.alernet.org y ESA

Entre las 46 áreas inundables de primer orden se encuentran 25 capitales de provincia (incluidas todas las mediteráneas), las áreas metropolitanas de las siete ciudades de mayor población, gran parte de las ciudades mediterráneas y sus zonas turísticas y los valles industriales del norte de España.

De forma similar, Protección Civil ha catalogado 1.398 puntos conflictivos en España en los que, periodicamente, suelen registrarse importantes inundaciones. Según este organismo, las grandes áreas en las que se concentran estos puntos son las cuencas norte y mediterránea. En la primera se localizan 300 puntos conflictivos. Los valles son estrechos y profundos y contienen importantes núcleos de población y complejos industriales. En el área mediterránea se concentra el mayor número de puntos conflictivos, repartidos a lo largo de las cuencas del Júcar, Segura y en las cuencas catalanas y andaluzas. En este caso, el origen de las inundaciones son las precipitaciones torrenciales de finales de verano y principios de otoño. La intensidad de las lluvias junto a la menor densidad de cobertura vegetal y las pronunciadas pendientes favorecen el arrastre de suelo y la acumulación de sedimentos en suspensión, condiciones hidrodinámicas que agravan los efectos de las inundaciones.

Para combatir o minimizar el impacto de las inundaciones se diseñan distintas medidas de mitigación o de defensa. Desde la Antigüedad, en Egipto, Mesopotamia, Grecia y Roma se diseñaron distintos tipos de diques y canales para contener y desviar las aguas y defender, a los asentamientos ubicados en zonas vulnerables, de eventuales inundaciones. Aunque distintas, en general pueden clasificarse estas medidas como estructurales que tienden a actuar sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de las avenidas y a construir infraestructuras de defensa.

Actualmente, se considera importante combinar los sistemas de prevención y de alerta temprana. Los sistemas de prevención se basan en diques, motas, barreras metálicas, embalses reguladores y mejora de la capacidad de desagüe de los cauces fluviales. Los sistemas de alerta ante situaciones peligrosas están muy desarrollados por medio de la predicción meteorológica, la observación de los aforos fluviales y los sistemas de detección de maremotos. También, son efectivas las medidas legales que, en muchas ocasiones, prohíben la construcción de zonas urbanas y de equipamientos en zonas inundables. Los Sistemas de Información Geográfica permiten cartografiar las zonas



Figura 91: Imagen óptica Landsat-TM, en pseudocolor natural, registrada el 1 de marzo de 2000. En comparación con la figura anterior, esta imagen se ve afectada por la cobertura nubosa, frecuente en estas latitudes tropicales, que dificulta una observación nítida y un seguimiento del fenómeno. Una de las zonas más afectadas fue la pequeña ciudad y el aeropuerto de Xai Xai, situados en la llanura aluvial del río Limpopo, cerca de su desembocadura.

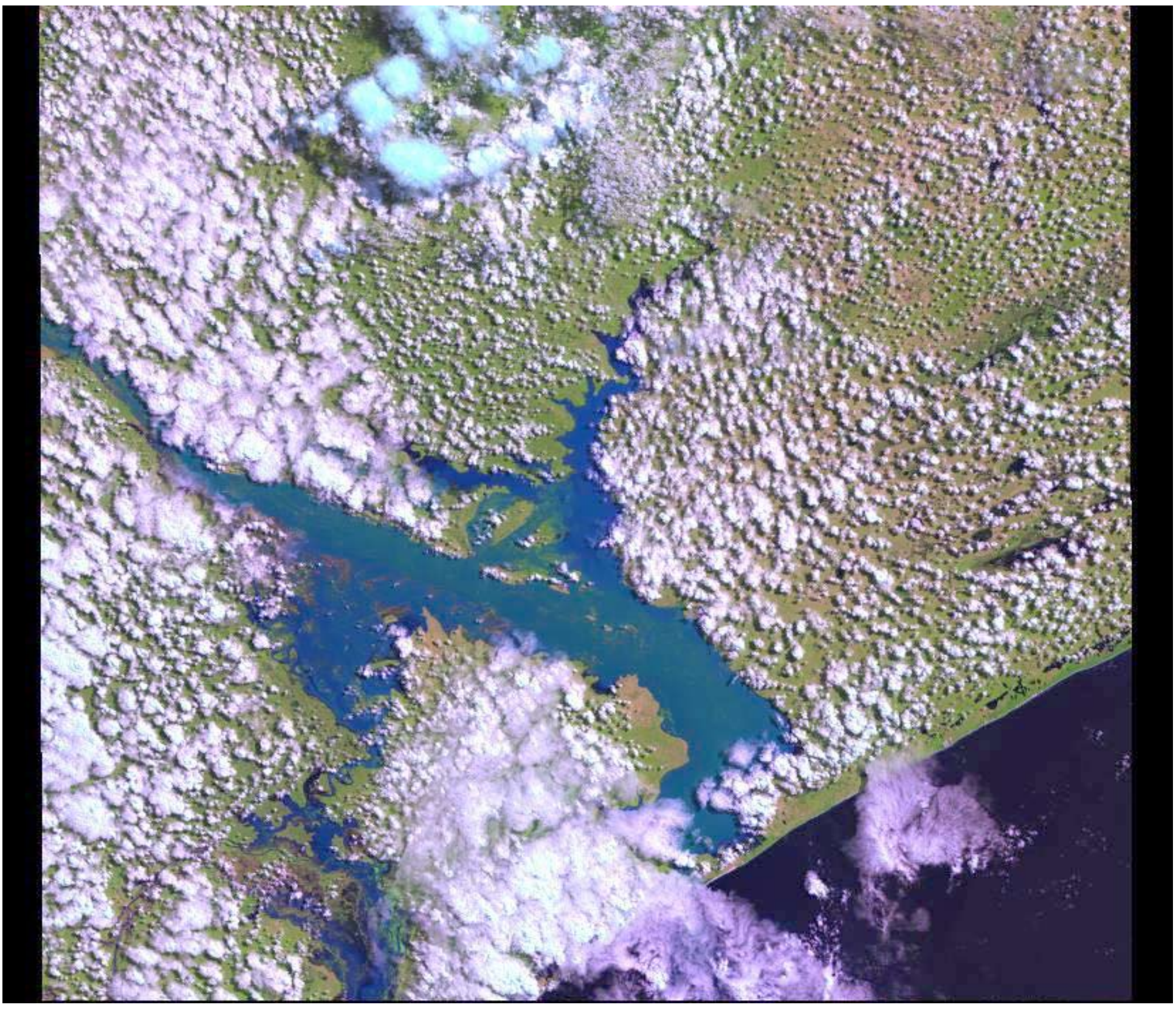
Fuente: www.alernet.org

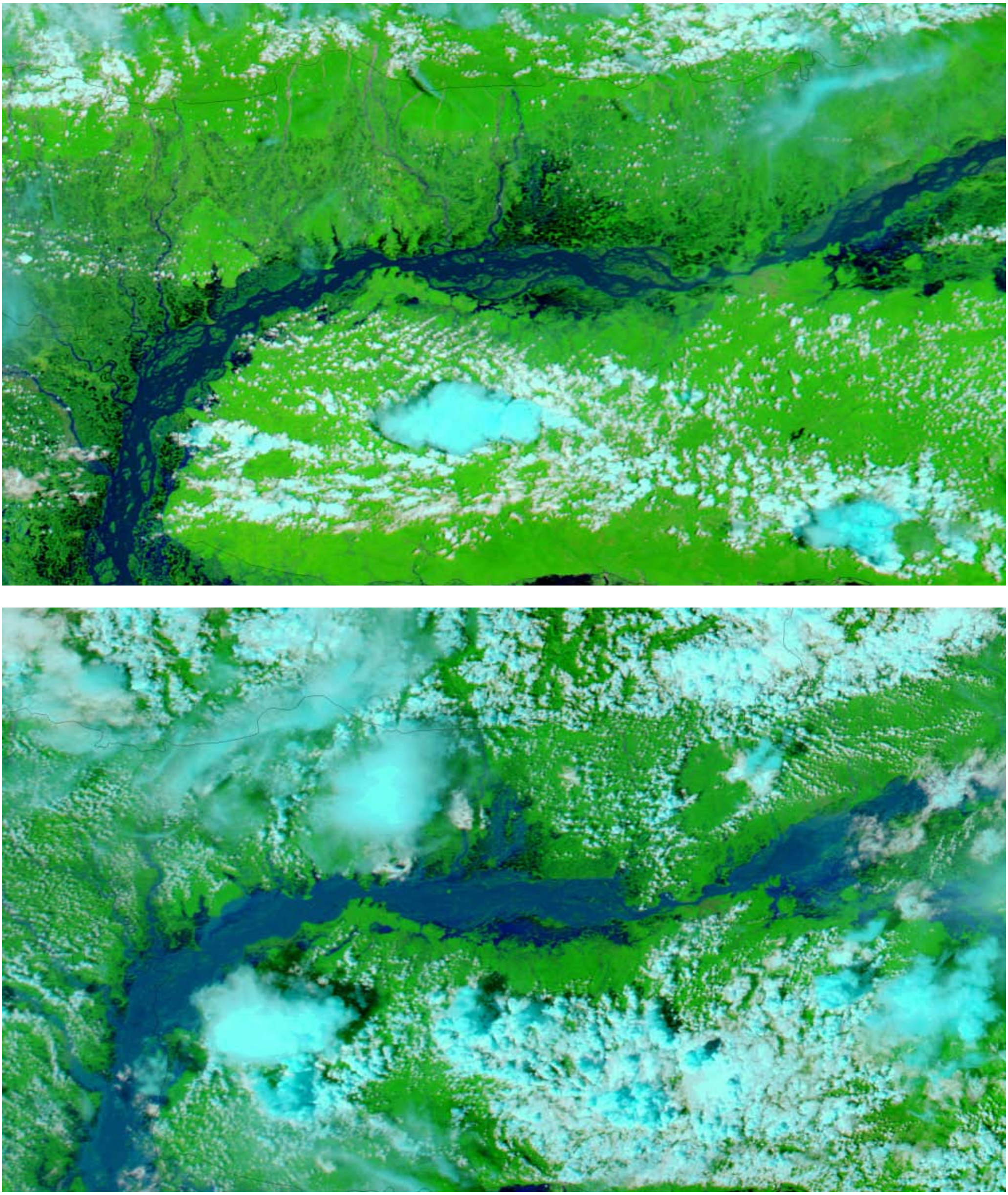
de riesgo, de manera que se incorpore esta información en el proceso de toma de decisiones de los gestores y planificadores del territorio.

En la actualidad, se cuestiona la utilidad de las medidas estructurales de mitigación y defensa de las inundaciones porque se ha demostrado, en distintos casos, que no sólo no han funcionado como se esperaba sino que, además, en ocasiones, han incrementado el impacto sobre las personas y las propiedades. Ahora comienza a defenderse la utilidad de las llamadas medidas no estructurales. Estas medidas, por sí mismas, no evitan las inundaciones pero sí mitigan su impacto. Entre ellas, se señalan como más importantes, además de los citados sistemas de alerta temprana, la ordenación de zonas inundables, la conveniencia de que los propietarios dispongan de seguros que cubran los daños provocados por este riesgo natural y una educación adecuada, tanto a escolares como a personas adultas, para prevenir el riesgo y autoprotegerse de él. En nuestro país, Protección Civil trabaja en estas líneas de actuación desde hace años.

En España se han sucedido diversas inundaciones a lo largo de la historia. Las cuencas más afectadas por este riesgo natural son las mediterráneas, debido a la ocurrencia recurrente de gotas frías, al final del verano y comienzos del otoño, que descargan intensas precipitaciones en cortos intervalos de tiempo de manera que son frecuentes los desbordamientos de ramblas, barrancos y ríos. Considerando los últimos cincuenta años, además de las catástrofes asociadas a la rotura de la presa de Tous y a la riada de Biescas ya mencionadas, conviene destacar la gran riada de Valencia, ocurrida el 14 de octubre de 1957 en las cuencas del Turia y del Palancia. El día anterior se produjeron abundantes precipitaciones que alcanzaron los 360 mm, a los que se sumaron otros 100 mm caídos el día 14. Se registraron caudales de hasta 3.700 m³/s, desbordándose el Turia a su paso por Valencia, anegando buena parte de la zona urbana. Para evitar nuevas inundaciones, se construyó un nuevo cauce, al sur de la ciudad, con una capacidad de 5.000 m³/s. El caudal del Palancia alcanzó los 900 m³/s y se desbordó a su paso por Sagunto.

El 19 de octubre de 1973 se produjeron nuevas inundaciones, entre otros lugares, en la cuenca del Segura. Las precipitaciones superaron los 300 mm en 24 horas en la cabecera del Guadalentín, alcanzando un caudal de 2.500 m³/s, a su paso por Lorca. El derrumba-





Figuras 92 (arriba) y 93 (abajo): Imágenes MODIS, en pseudocolor natural, tomadas por el satélite Aqua, los días 5 de agosto y 12 de septiembre de 2007, respectivamente. Se observa el río Brahmaputra, en el sector comprendido entre la frontera de Bangladesh e India, en el suroeste de la imagen, y Guwahati, la capital comercial del estado indio de Assam, a orillas del río en el centro oriental de la imagen. La secuencia de imágenes muestra la segunda y tercera inundación producidas en 2007 por el desbordamiento del Brahmaputra como consecuencia de las intensas lluvias monzónicas que asolaron los territorios del noreste de India y de Bangladesh y Bhutan. En la imagen inferior, el río alcanza hasta 25 km de ancho en algunos lugares. El color azul medio-claro se corresponde con masas de agua que contienen una abundante carga de sedimentos, propia de las crecidas de ríos que proceden de alta montaña. Es el caso de los tributarios del Brahmaputra, por su margen derecha (norte), que descienden desde el Himalaya.

Fuente: MODIS Rapid Response Team, NASA GSFC



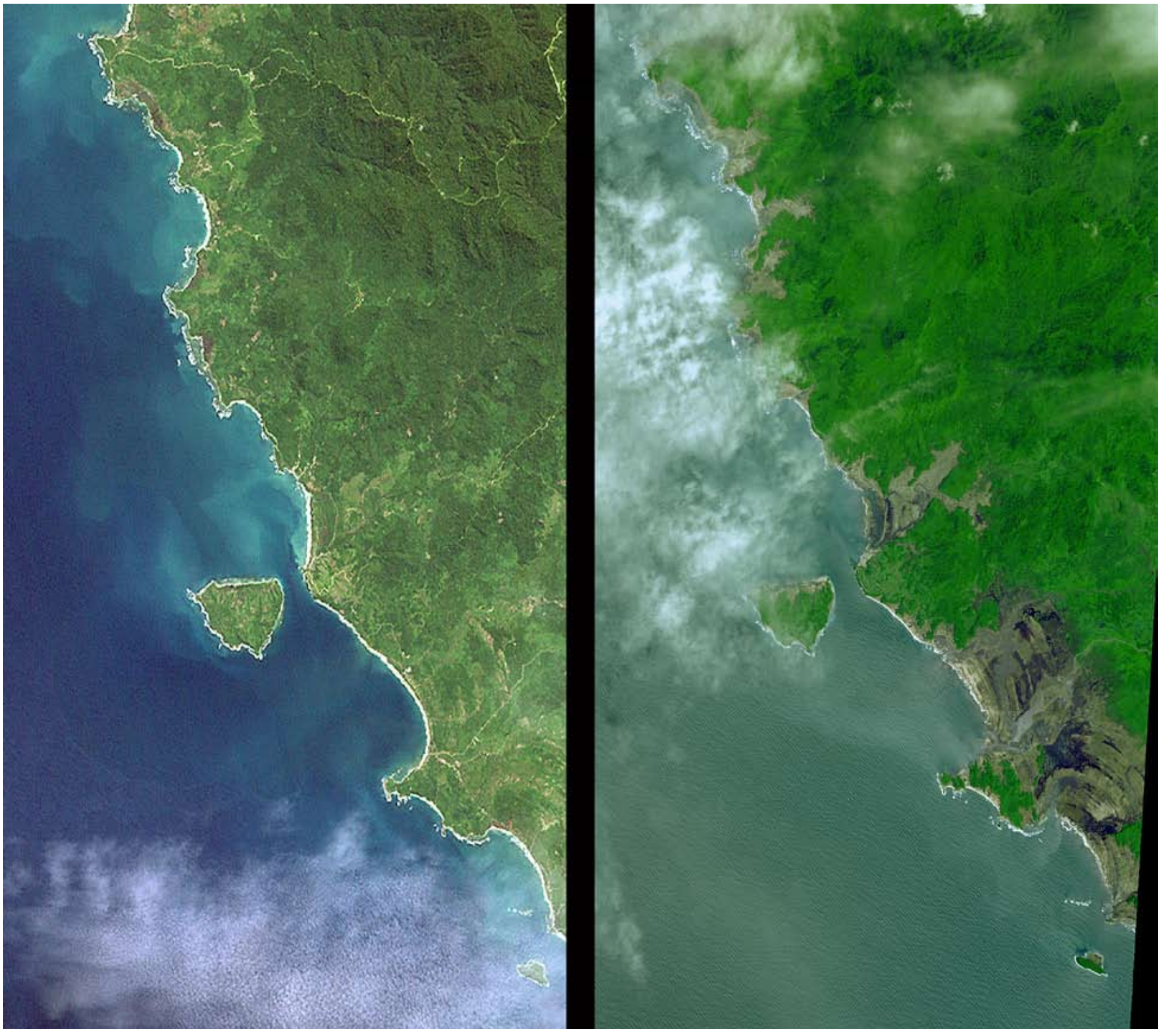
miento de casas y puentes por los elevados caudales e inundaciones ocasionaron la muerte de más de 100 personas. La crecida llegó al Segura, ocasionando nuevas catástrofes en las zonas ribereñas de Murcia y Orihuela.

Otro ejemplo de catástrofe se produjo el 30 de septiembre de 1997 en la ciudad de Alicante. Una nueva gota fría es responsable de intensas precipitaciones, cuantificadas en 270 mm en medio día. La situación fue crítica como consecuencia del proceso urbanizador sobre algunas zonas inundables por las ramblas y torrentes. Las inundaciones afectaron a barrios como los de San Agustín y La Albufereta. En la rambla de las Ovejas se registró un caudal de 100 m³/s. A pesar de ello, el barrio de San Gabriel no resultó afectado gracias a las obras de canalización de la rambla.

En el mes de octubre de 2000, una gota fría de grandes dimensiones ocasionó abundantes precipitaciones en toda la cuenca mediterránea. En distintos sectores de la provincia de Castellón se registraron hasta 500 mm. En la presa de María Cristina, construida para regular un afluente del río Mijares, el agua se desbordó y se activaron las alertas como consecuencia del peligro de rotura de la presa. En la ciudad de Valencia se registró un volumen de precipitaciones similar al de la gran riada de 1957. En esta ocasión, el desvío del cauce cumplió su misión de forma adecuada.

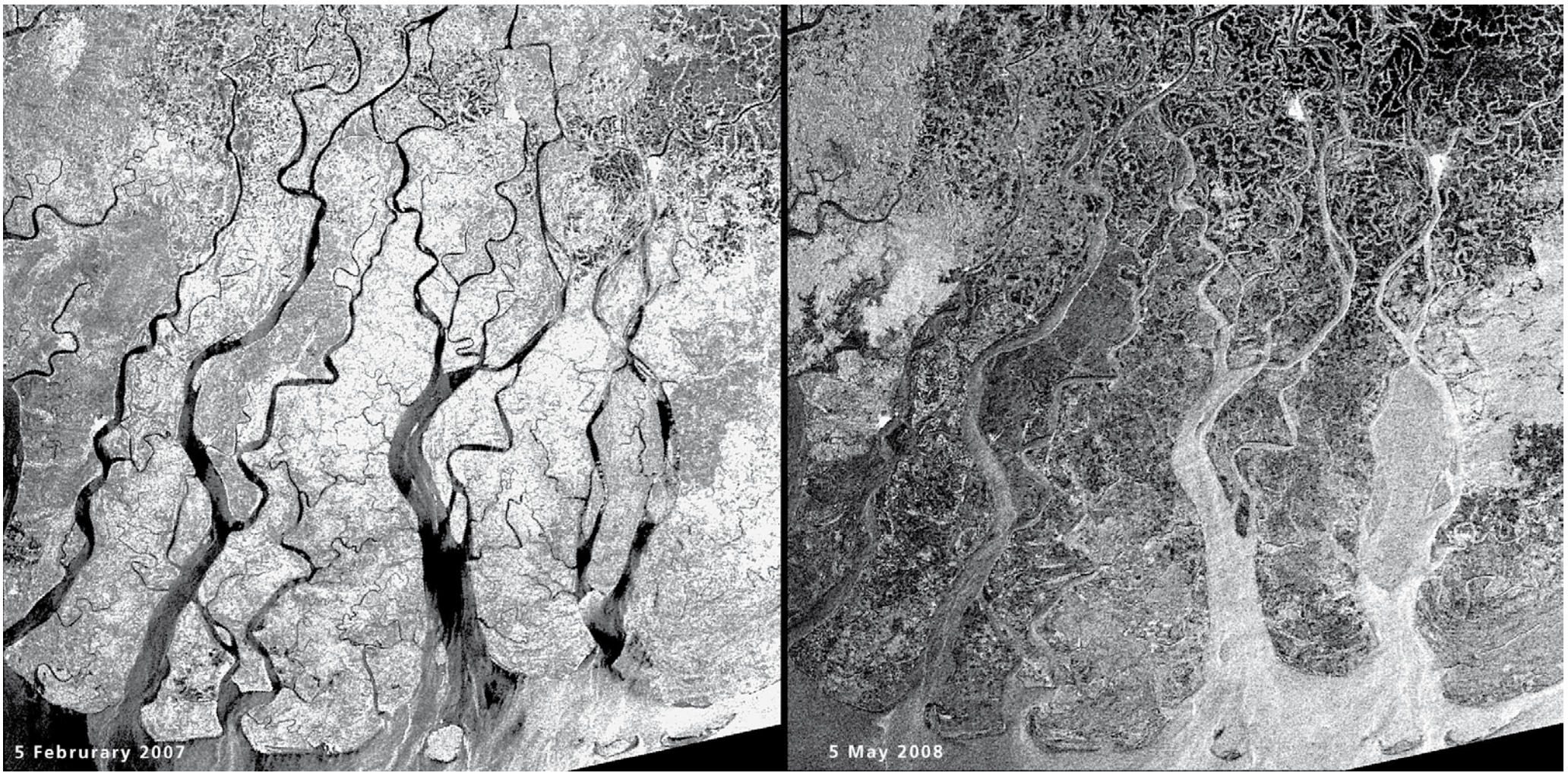
Menos frecuentes son las inundaciones en otras cuencas hidrográficas españolas.

Aunque excepcionalmente, las intensas precipitaciones también pueden ocasionar inundaciones en la cuenca del Norte. Según Mateu y Camarasa (2000), refiriéndose a un estudio del MOPU sobre los episodios catastróficos de los últimos 500 años, la cuenca del Norte registra una



Figuras 94 (izquierda) y 95 (derecha): Imagen Landsat 7-ETM+, captada en junio de 2001, y ASTER, registrada el 12 de enero de 2005, respectivamente. Cubren una superficie de unos 130 km², aproximadamente, situada en el noroeste de la isla indonesia de Sumatra, a unos 80 km al sur de Banda Aceh. Las ciudades costeras de Bahak Nipah y Keudepate han sido arrasadas por los efectos del tsunami producido en diciembre de 2004, unos días antes de la toma de la imagen ASTER. En ésta se observa, en colores ocres y azules oscuros, cómo las zonas costeras topográficamente más bajas han sido inundadas por las olas, destruyendo lo que se encontraron a su paso.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team









Figuras 96 (arriba a la izquierda) y 97 (arriba a la derecha): Imágenes radar ASAR, captadas desde el satélite ENVISAT los días 5 de febrero de 2007 y 5 de mayo de 2008. La imagen de la izquierda muestra el delta del río Irrawaddy, en el sur de Birmania, al suroeste de Rangoon. La imagen de la derecha muestra una vista de las inundaciones provocadas, en la misma zona, un año después, por el paso del ciclón Nargis, de categoría 4, que tocó las costas birmanas el día 3 de mayo de 2008. Este ciclón causó 28.458 muertos, 33.019 heridos y 33.416 desaparecidos, según datos oficiales.
Fuente: ESA

Figuras 98 (centro a la izquierda) y 99 (abajo a la izquierda): Imágenes MODIS, en pseudocolor natural, adquiridas por el satélite TERRA los días 15 de abril y 5 de mayo de 2008. Ilustran el momento anterior y posterior al impacto del ciclón Nargis sobre la región del delta del río Irrawaddy. Entre las nubes, se evidencian las masas de agua, en color azul, que han ensanchado los canales del río, en su delta, y que han inundado gran parte de la zona próxima a la capital del país, Rangoon (Yangón en estas imágenes) y a Pegu.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/19000/19874/Myanmar_TMO_2008126.jpg MODIS Rapid Response Project at NASA/GSFC

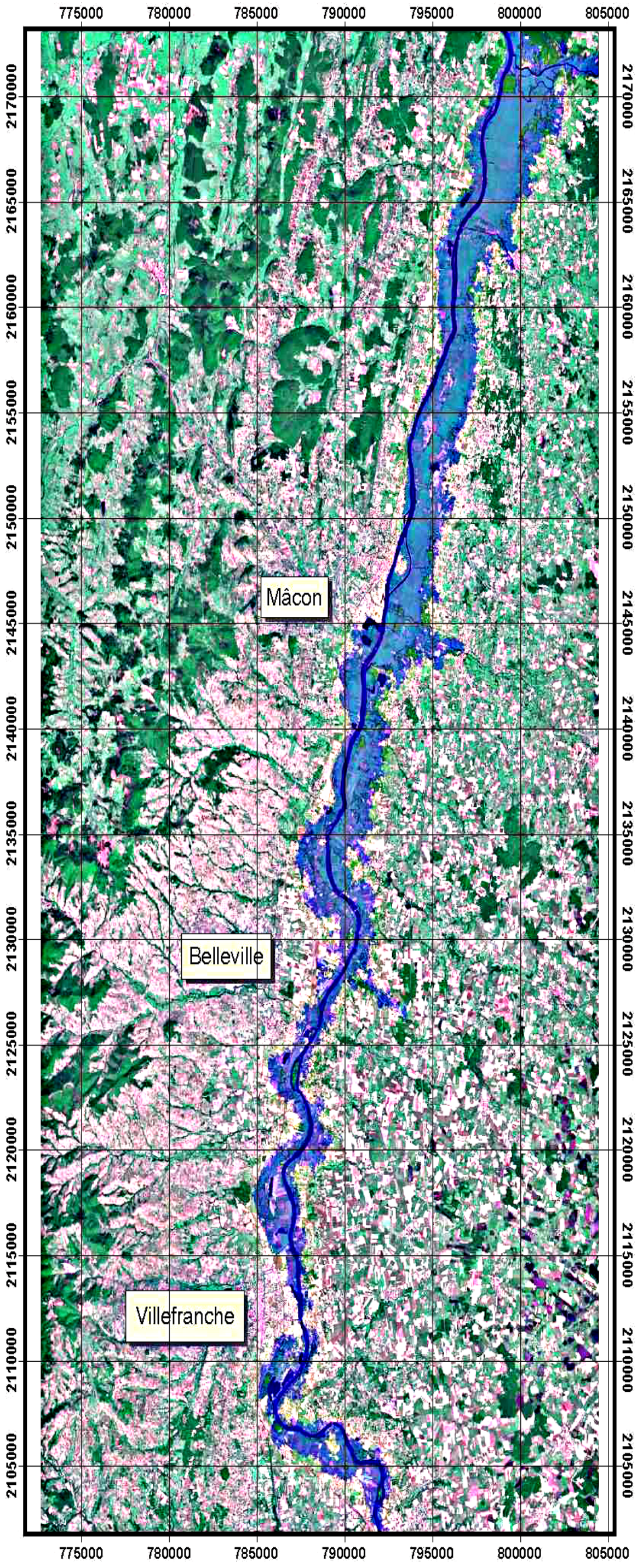


Figura 100: Imagen SAR del satélite ERS-2, fusionada con una cartoimagen SPOT, en color natural. De esta composición se ha extraido la cartografía del área inundada, el 27 de marzo de 2001, en el río Saône, en el tramo comprendido entre Tournous y Villefranche, unas decenas de kilómetros al norte de Lyon.

Fuente: ESA/CNES-SpotImage/SERTIT



media de 2,8 inundaciones por cada 1.000 km², cifra significativamente menor que la media de la cuenca del Segura (11,2 inundaciones por cada 1.000 km²). El 26 de agosto de 1983 se produjeron las precipitaciones más intensas que se recuerdan en el País Vasco. En algunos puntos se alcanzaron los 500 mm. Este volumen de lluvias motivó el desbordamiento del río Nervión que ocasionó cuantiosos daños materiales en Bilbao y en otras localidades vizcaínas y decenas de fallecimientos.

También es menor la vulnerabilidad histórica de otras cuencas atlánticas de la Península Ibérica frente a inundaciones. De acuerdo a los datos de la fuente anteriormente citada, la cuenca del Guadiana alcanza una cifra de 2,4 inundaciones por cada 1.000 km². Asimismo, considerando el periodo de 500 años antes referenciado, la cuenca del Guadiana registra una media de 0,3 inundaciones al año, cifra muy inferior a la de otras cuencas peninsulares. El 5 de noviembre de 1997, las intensas lluvias provocadas por un fuerte temporal del SW ocasionaron la repentina crecida de varios afluentes del Guadiana, por su margen izquierda, provocando importantes inundaciones en las localidades de Valverde de Leganés y de Badajoz. Además de las importantes pérdidas materiales, hay que reseñar la muerte de varias personas.

En el resto del mundo se han producido importantes inundaciones que ejemplifican las causas que antes se han descrito. Las figuras de esta sección de la guía ilustran algunos casos significativos que, seguramente, los lectores guardan en sus memorias.

En Norteamérica, además de las inundaciones provocadas por la sucesión anual de huracanes en las costas surorientales de Estados Unidos, conviene recordar la gran inundación de 1993 causada por el desbordamiento del río Mississippi. Se ha catalogado como la peor catástrofe hidrológica de Estados Unidos desde las ocurridas en la década de los años 30. En la cuenca de este río, este tipo de eventos suelen ocurrir entre 3 y 4 veces cada siglo. Un par de años después, en agosto de 2005, las lluvias asociadas al huracán Katrina junto a la rotura de un dique, ocasionaron la inundación de la ciudad de Nueva Orleans, en el delta del Mississippi. Como ya se ha indicado, el agua alcanzó 9 m de altura en algunos sectores de la ciudad y

ésta hubo de ser completamente evacuada.

En Sudamérica, el 13 de noviembre de 1985 se produjo la catástrofe de la ciudad de Armero, que quedó arrasada como consecuencia de la colada de barro originada por la fusión de la nieve del cono volcánico del Nevado del Ruiz, después de su erupción, y su mezcla con los materiales volcánicos. Se contabilizaron más de 25.000 muertos y cuantiosas pérdidas materiales.

Otra de las catástrofes que los lectores recordarán tristemente, por la magnitud de los daños, es el tsunami de Indonesia, producido el 26 de diciembre de 2004. Muchos países ribereños del Índico se vieron afectados por la brusca elevación del nivel del mar originada por el maremoto, cuyo epicentro se localizó al oeste de Indonesia. La intensidad del mismo se cifró en 9,2 en la escala de Richter. La ola producida alcanzó, en algunos lugares, los 30 m, arrasando lo que encontró a su paso. Los daños provocados afectaron a las zonas litorales de Indonesia, principalmente, y de India, Sri Lanka, Bangladesh y Tailandia. Se contabilizaron más de 300.000 muertos y un gran número de desaparecidos.

Por último, cabe señalar que la vulnerabilidad ante inundaciones se agrava en buena parte de los deltas de los grandes ríos del mundo, según un estudio de la Universidad de Colorado. Este fenómeno se debe a una combinación de causas. Se está produciendo un hundimiento relativo de los deltas como consecuencia de la elevación del nivel del mar debido al cambio climático y a la disminución de los aportes de sedimentos como consecuencia de la construcción de grandes embalses en sus cuencas y a la desviación de sus cauces, en algunos casos. Los ríos más afectados son el Colorado, el Nilo y el Yangtze.





Figuras 101 (izquierda en página anterior) y 102 (arriba): Imágenes Ikonos, en color natural, tomadas los días 18 y 22 de septiembre de 2004, respectivamente, sobre la ciudad de Gonaïves, en la costa noroeste de Haití. Comparando ambas imágenes pueden apreciarse los efectos ocasionados por el paso de la tormenta tropical Jeanne.

Haiti es particularmente vulnerable a las inundaciones como consecuencia de la intensa deforestación que sufre la mitad de la isla La Española. Sin una cobertura forestal que reduzca la escorrentía, el agua corre a gran velocidad hasta que se remansa en las zonas más bajas de la ciudad.
Han desaparecido buena parte de las calles y de los edificios de esta ciudad, cercana a 200.000 habitantes. El barro depositado tras las intensas lluvias es visible en las calles y terrenos sin edificar del suroeste de la ciudad, en un color marrón intermedio. En la zona noroeste de la imagen se observa una extensa lámina de agua que cubre gran parte de esta pequeña península. Estas inundaciones han ocasionado la muerte de 1.260 personas y varios miles más de personas desaparecidas, de acuerdo a los informes oficiales.

Fuente: Cortesía de Space Imaging
http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/14000/14000/Gonaives_IKO_2004266.jpg

5.1.4. TERREMOTOS

La palabra terremoto proviene del griego, temblor. También es conocido el fenómeno con los nombres de seísmo y sismo. Se trata de un movimiento brusco de la Tierra que se produce cuando se libera, repentinamente, la energía acumulada, durante largo tiempo, por el rozamiento de las placas tectónicas en sus desplazamientos, cuando se supera el estado de equilibrio mecánico.

Por este motivo, la distribución geográfica de los terremotos de origen tectónico coincide con la localización de las grandes fallas geológicas y de los bordes de las placas tectónicas. No obstante, también ocurren terremotos por otras causas. Pueden deberse a procesos volcánicos, al hundimiento de cavidades cársticas, a masivos movimientos de ladera e, incluso, a determinadas actividades humanas como la realización de pruebas nucleares.

El hipocentro es el punto interior de la Tierra donde se origina el seísmo mientras que el epicentro se llama al punto de la superficie que se encuentra en la vertical del hipocentro. En el epicentro es donde repercuten, con mayor intensidad, las ondas sísmicas.

El instrumento que se utiliza para medir la magnitud y duración de un terremoto se llama sismógrafo. Registra la vibración de la Tierra y dibuja un gráfico denominado sismograma.

Existen varias escalas de medida. Una de las más utilizadas y conocidas es la escala Richter, ideada en 1935 por el Dr. Charles F. Richter. Tiene en cuenta la energía sísmica liberada en cada terremoto. Relaciona la magnitud de un terremoto con la longitud de la onda sísmica. Para la calibración de la escala, Richter analizó una onda S, la que se propaga transversalmente al sentido de vibración de los materiales, en un tiempo de 20 segundos en un registro sismográfico. No se trata de una escala lineal, sino que es una escala semilogarítmica.

Escala de Richter

Magnitud	Efectos del terremoto
< de 3,5	Generalmente no se siente, pero es registrado
3,5 - 5,4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores
5,5 - 6,0	Ocasiona daños ligeros a edificios
6,1 - 6,9	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas
7,0 - 7,9	Terremoto mayor. Causa graves daños
>= 8	Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Richter

Cada terremoto tiene una magnitud única. Sin embargo, puede ocurrir que los efectos de dos seísmos con la misma intensidad sean muy diferentes en unas zonas respecto a otras. Ello se debe a las desiguales condiciones del terreno, a su distancia respecto al epicentro, a los materiales geológicos del substrato y a los diferentes estándares de construcción entre zonas. En otras palabras, no todas las zonas tienen la misma vulnerabilidad. Un ejemplo puede ilustrar esta idea. En Japón, algunos terremotos que se han producido con una magnitud de 7, apenas han causado daños materiales ni pérdidas de vidas humanas. Sin embargo, en otras zonas del planeta, donde no se presta la misma atención a las normas constructivas ni se aplican criterios de antisismicidad en los edificios, un terremoto de magnitud equivalente puede causar una auténtica catástrofe, con cuantiosos daños materiales y un gran número de víctimas mortales. Tristemente, éste ha sido el caso del terremoto registrado en la madrugada del 13 de enero de 2010, en Haití.

Otra escala de medida utilizada es la de Mercalli. La ideó, en 1902, el sismólogo italiano Giusseppe Mercalli. Esta escala no se fundamenta en la magnitud del terremoto, sino que se basa en los efectos producidos sobre las edificaciones, equipamientos e infraestructuras. Según este criterio, a un mismo terremoto se le pueden asignar distintas intensidades dependiendo de las zonas afectadas y de los efectos producidos en cada una de ellas. A diferencia de la escala de Richter, la de Mercalli es una escala lineal.

Escala de Mercalli

Intensidad	Efectos y percepción de los mismos
Grado I	Sacudida sentida por muy pocas personas.
Grado II	Sacudida sentida por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
Grado III	Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios. Muchas personas no lo asocian con un temblor. Los vehículos estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración similar a la originada por el paso de un vehículo pesado. Duración estimable
Grado IV	Temblor sentido durante el día por muchas personas en los interiores y por pocas en el exterior. Por la noche, algunas despiertan. Vibración de vajillas, cristales de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación similar a la de un vehículo pesado chocando contra un edificio. Los vehículos estacionados se balancean claramente.
Grado V	Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajilla y cristales de ventanas se rompen; pocos casos de agrietamiento; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
Grado VI	Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de daño en chimeneas. Daños ligeros.
Grado VII	Advertido por todos. La población huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; rotura de algunas chimeneas. Percibido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
Grado VIII	Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en la personas que conducen vehículos.
Grado IX	Daño considerable en las estructuras bien diseñadas; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
Grado X	Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
Grado XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
Grado XII	Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel (ríos, lagos y mares). Objetos lanzados en el aire hacia arriba.

http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismol%C3%B3gica_de_Mercalli

En Europa, actualmente, se utiliza la escala EMS98 (*European Macroseismic Scale 1998*), que adapta la de Mercalli a los efectos producidos

sobre las construcciones actuales (Ugalde, 2009).

La probabilidad de ocurrencia de terremotos de una determinada magnitud en una región concreta, viene dada por una distribución de Poisson. En el mundo, la frecuencia de ocurrencia de terremotos es inversamente proporcional a su magnitud. Como puede observarse en la siguiente tabla, son menos frecuentes los de mayor intensidad mientras que son mucho más frecuentes los terremotos de pequeña magnitud.

Se estima que, en el mundo, unos 130 millones de habitantes están expuestos a los terremotos. La vulnerabilidad relativa más alta la registran Irán, India y Afganistán y, en menor grado, Turquía y Rusia.

Frecuencia de terremotos en el mundo

Magnitud	nº de terremotos (promedio anual)
2,0 - 2,9	1.300.000
3,0 - 3,9	130.000
4,0 - 4,9	13.000
5,0 - 5,9	1.319
6,0 - 6,9	134
7,0 - 7,9	17
>= 8	1

Fuente: Instituto Geográfico Nacional

Como puede observarse en la figura 103, el impacto de los terremotos sobre las vidas humanas, a nivel mundial, ha sido muy desigual a lo largo de las últimas décadas. El peor año fue 1990. A lo largo de él, ocurrieron dos eventos trágicos. En Irán se registró un terremoto devastador, con una magnitud de 7,5 en la escala de Richter. Ocasionó 50.000 muertos. Ese mismo año, en Filipinas, ocurrió otro terremoto de intensidad 7,7 que afectó, principalmente, a Manila y Luzón. Murieron más de 1.500 personas.

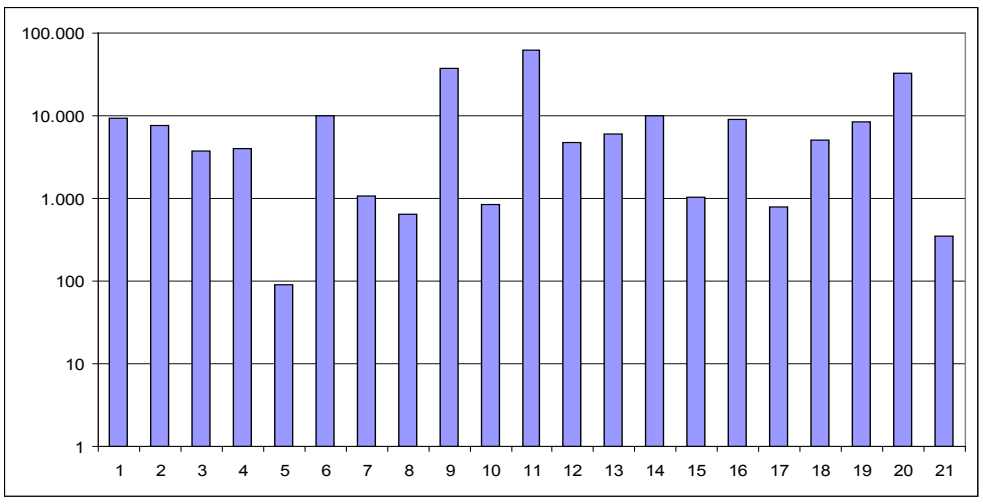


Figura 103: Número de víctimas mortales, en el mundo, por terremotos entre 1980 (1) y 2000 (21).
Fuente: Anuario de Agostini

Terremotos ocurridos desde 1900 que han ocasionado más de 50.000 muertos

Fecha	Magnitud	Lugar	nº muertos
27.07.1976	7,5	Tangshan, China	255.000
26.12.2004	9,0	Sumatra, Indonesia	240.000
22.05.1927	7,9	Xining, China	200.000
16.12.1920	8,6	Gansu, China	200.000
01.09.1923	7,9	Kwanto, Japón	143.000
05.10.1948	7,3	Ashgabat, Turkmenistán	110.000
28.12.1908	7,2	Messina, Italia	100.000
12.05.2008	6,6	Sichuan, China	87.587
08.10.2005	7,6	Pakistán	86.000
25.12.1932	7,6	Gansu, China	70.000
31.05.1970	7,9	Perú	66.000
30.05.1935	7,5	Quetta, Pakistán	60.000
20.06.1990	7,7	Irán	50.000

Fuente: ISC-USGS.

Exceptuando el terremoto de Indonesia, de 2004, los terremotos que más muertos han ocasionado no figuran entre los de mayor magnitud. Sin embargo, una combinación de factores, que han influido en la vulnerabilidad, han desencadenado grandes tragedias en estos países afectados.

En algunos casos, las víctimas fallecieron por los efectos directos de los terremotos y, además, por la ocurrencia de otros fenómenos derivados como tsunamis, incendios, grandes deslizamientos de laderas, grandes fracturas e inundaciones.

Entre todos los terremotos ocurridos, vamos a reseñar algunos que han alcanzado las máximas magnitudes y que han ocasionado grandes catástrofes a lo largo de la historia.

Entre todos ellos, el que ostenta el récord de intensidad fue el terremoto ocurrido en Valdivia (Chile), los días 21 y 22 de mayo de 1960. Alcanzó una magnitud de 9,5 en la escala de Richter y se le asignaron los grados XI y XII, según la escala de Mercalli. Ha sido el mayor movimiento telúrico registrado hasta ahora.

El 21 de mayo hubo un primer terremoto que afectó a buena parte de las infraestructuras. El día 22 de mayo se registró una réplica, de mayor intensidad. Finalmente, el seísmo originó diversos tsunamis que afectaron, adicionalmente, al sur de Chile y otras zonas de la costa chilena y de otros países del Pacífico (Estados Unidos, Hawai, Filipinas y Japón).

El temblor se sintió en todo el cono Sur de América. Se registraron 5.000 víctimas mortales en la región, 3.000 heridos y 2 millones de viviendas afectadas. La ciudad de Valdivia quedó prácticamente destruida. Los ríos cambiaron su curso y se crearon nuevos lagos.

El seísmo de Alaska, ocurrido el 26 de marzo de 1964, alcanzó una intensidad de 9,4 en la escala de Richter. Se contabilizaron, oficialmente, 131 víctimas mortales. El terremoto originó olas de gran altura que arrasaron tres poblaciones costeras. Sus efectos se extendieron a otros estados norteamericanos como Oregón y California.

El terremoto de Indonesia, ocurrido el 26 de diciembre de 2004, alcanzó una magnitud de 9,0 en la escala de Richter. Su intensidad lo sitúa entre los cinco peores terremotos registrados en el mundo desde que existen métodos fiables de medida. Su epicentro se localizó frente a la costa noroccidental de Sumatra.

El terremoto se produjo como consecuencia del rozamiento entre las placas tectónicas de India y de Birmania. La primera se desplaza a una velocidad de 5 cm/año. El seísmo provocó varios tsunamis. Las olas, de alturas superiores a los 6 m, asolaron las costas de Indonesia y de sus países vecinos como Sri Lanka, Tailandia, India y de otros países bañados por el Índico.

Las primeras estimaciones calcularon un elevado número de víctimas mortales, en torno a 150.000 y otros muchos desaparecidos, además de unas cuantiosas pérdidas materiales. Más tarde, las cifras oficiales elevaron el número de muertos a 240.000.

En España, es poco frecuente la ocurrencia de terremotos de alta intensidad. Al contrario, son relativamente frecuentes los sismos de pequeña magnitud, como puede apreciarse en la tabla siguiente.

Número de terremotos detectados por la Red Sísmica Nacional en la Península Ibérica entre 2000 y 2008.

Magnitud	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
> 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,1-7,0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
5,1-6,0	0	0	2	1	7	1	3	1	1
4,1-5,0	4	1	22	37	90	23	16	6	15
3,1-4,0	47	65	79	127	827	119	127	78	98
2,1-3,0	769	833	485	391	548	558	519	638	619
1,1-2,0	549	539	1226	1499	1971	2554	1981	2641	2673
0,1-1,0	2	2	316	314	322	434	455	1002	799
TOTAL	1371	1440	2130	2369	3766	3689	3101	4367	4205

Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Las zonas más afectadas suelen localizarse en Andalucía y el sureste peninsular, en las áreas próximas al contacto entre los bordes de las placas euroasiática y africana.





Figura 104: Imagen Ikonos, adquirida el 27 de diciembre de 2003 sobre la ciudad de Bam (Irán), un día después de la ocurrencia de un terremoto, de magnitud 6,7. Destruyó el 70% de los edificios de la ciudad, una urbe fortaleza de 2000 años de antigüedad, declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Es una ciudad que se encontraba en la ruta de la seda y era famosa por sus tejidos. Sus casas y muralla de adobe no resistieron el temblor.

En la imagen se observa el centro histórico de la ciudad en el centro de la imagen, al sur del río que recorre su tercio septentrional. El perímetro de la ciudadela es muy perceptible. Dentro de ella, se puede apreciar la huella del terremoto. Gran parte de los edificios han sido afectados por el terremoto.

Extramuros, la ciudad actual ha registrado un rápido crecimiento como un centro agrícola e industrial. Se evidencia un plano reticular, en forma de damero.

Fuente: Space Imaging





Figura 105 (arriba): Imagen QuickBird en color natural, tomada el día 30 de septiembre de 2003 sobre la ciudad de Bam, Irán, tres meses antes del terremoto. Se observa la ciudadela fortificada por su muralla perimetral y el conjunto de viviendas de adobe.

Fuente: www.digitalglobe.com

Figura 106 (abajo): Imagen QuickBird en color natural, tomada el día 3 de enero de 2004 sobre la ciudad de Bam, Irán, ocho días después del terremoto. Como puede apreciarse, toda la ciudadela ha sido devastada. La zona meridional, así como los sectores oriental y occidental del recinto amurallado, han sido destruídos. El hundimiento de las viviendas ha desdibujado la trama urbana. Los contrafuertes y otros elementos defensivos de la muralla han desaparecido.

Fuente: www.digitalglobe.com







Figura 107 (arriba): Imagen QuickBird, en color natural, tomada el día 23 de junio de 2004 sobre la costa septentrional de Banda Aceh (Sumatra, Indonesia), antes del tsunami originado como consecuencia del terremoto de Indonesia, que alcanzó una magnitud de 9,0 en la escala de Richter.
Fuente: www.digitalglobe.com

Figura 108 (abajo): Imagen QuickBird, en color natural, adquirida, sobre el mismo sector de Banda Aceh, el 28 de diciembre de 2004. Como puede apreciarse, buena parte de las infraestructuras portuarias, de los equipamientos y de las viviendas han sido completamente destruidos. Parte de la barra litoral situada en el centro de la imagen ha desaparecido. Más al sur, las tierras bajas han sido ocupadas por el agua.
Fuente: www.digitalglobe.com



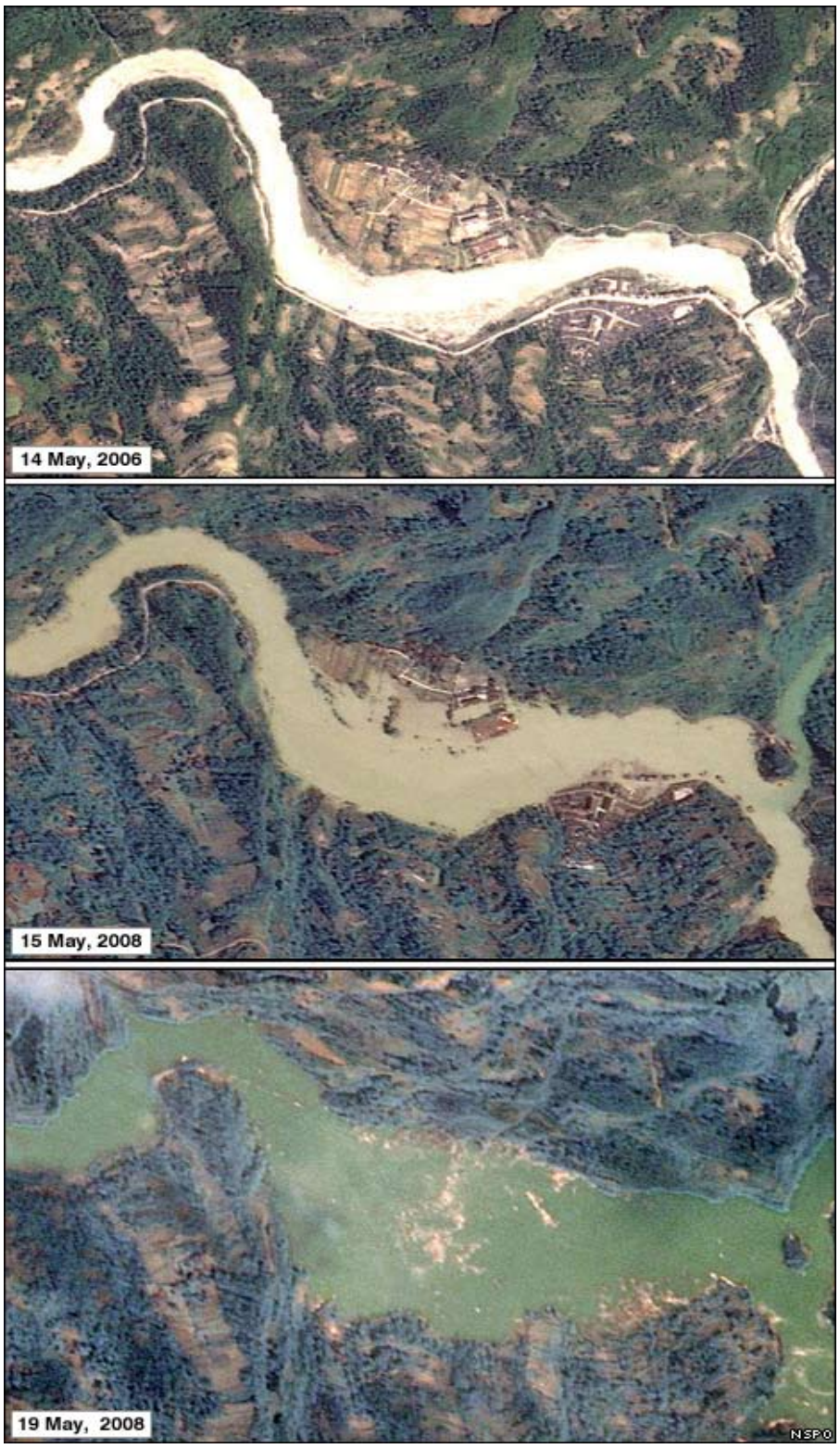


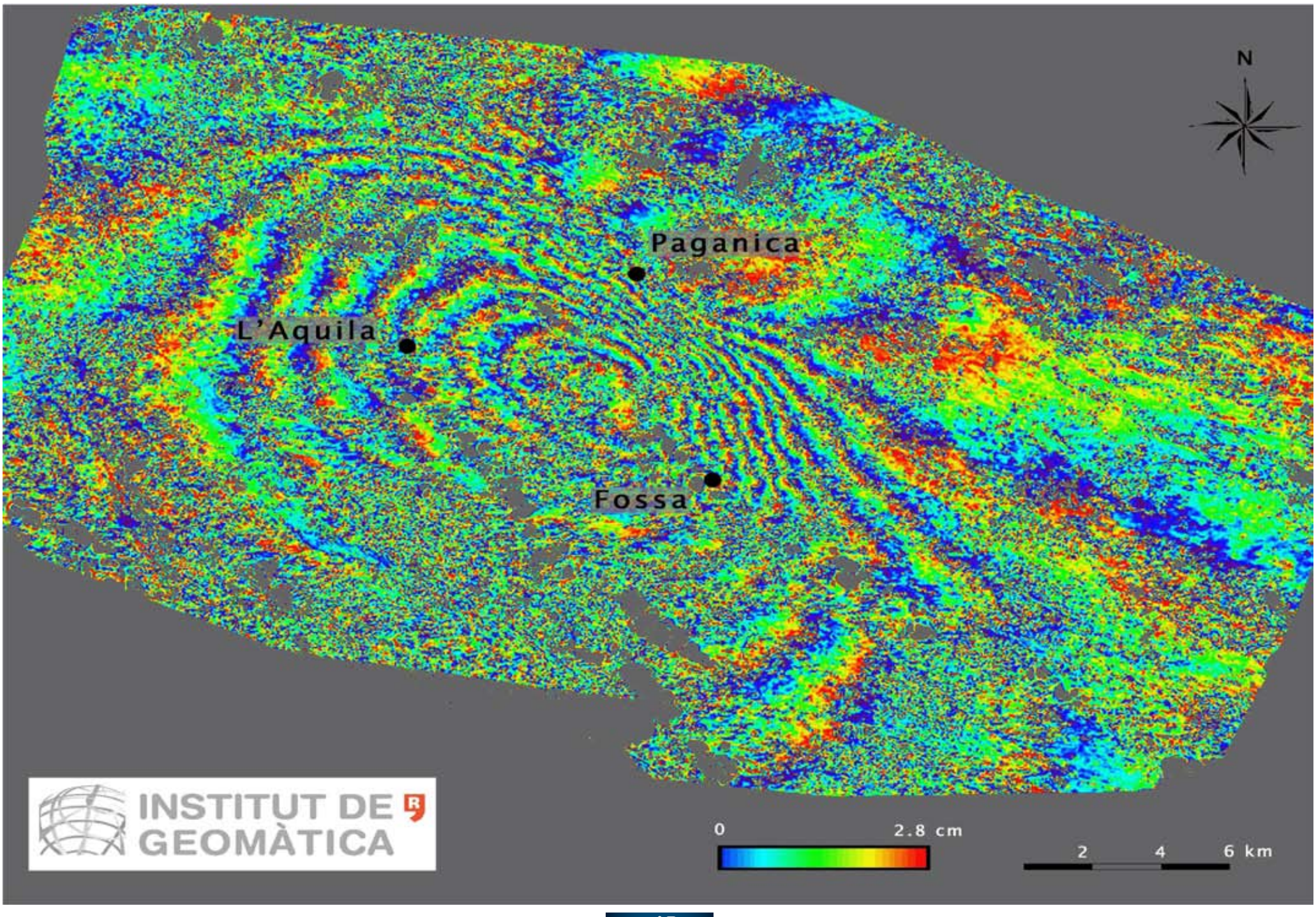


Figura 109 (izquierda): Serie de imágenes, en color natural, adquiridas por el satélite Formosat-2 antes del terremoto de Sichuán (14 de mayo de 2006, arriba) y después del mismo (15 de mayo de 2008, en el centro, y 19 de mayo de 2008, abajo). En la zona de Beichuan, el terremoto ocasionó deslizamientos de ladera que han obstruido el río Jianjiang, generando un nuevo lago (Tangjiashan). Bajo él han quedado sumergidas dos ciudades, tres puentes y 17 km de carreteras.

Fuente: Taiwan's National Space Organisation (NSPO)

Figura 110 (abajo): Mapa de las deformaciones del terreno ocasionadas por el seísmo, ocurrido el 6 de abril de 2009, en la localidad de L'Aquila, en la región italiana de Abruzzo. Este mapa ha sido construido mediante interferometría a partir de los datos obtenidos por el radar de apertura sintética (ASAR) que viaja a bordo del satélite Envisat. Ha sido derivado de la síntesis de dos imágenes, adquiridas antes (1 de febrero de 2009) y después del terremoto (12 de abril de 2009). Cada banda de color del mapa representa un desplazamiento del terreno de 2,8 cm. Puede observarse que desde el oeste (zona no afectada por el terremoto) hasta la localidad de L'Aquila (la zona más afectada) se acumula una deformación del terreno de 18 cm.

Fuente: Institut de Geomàtica



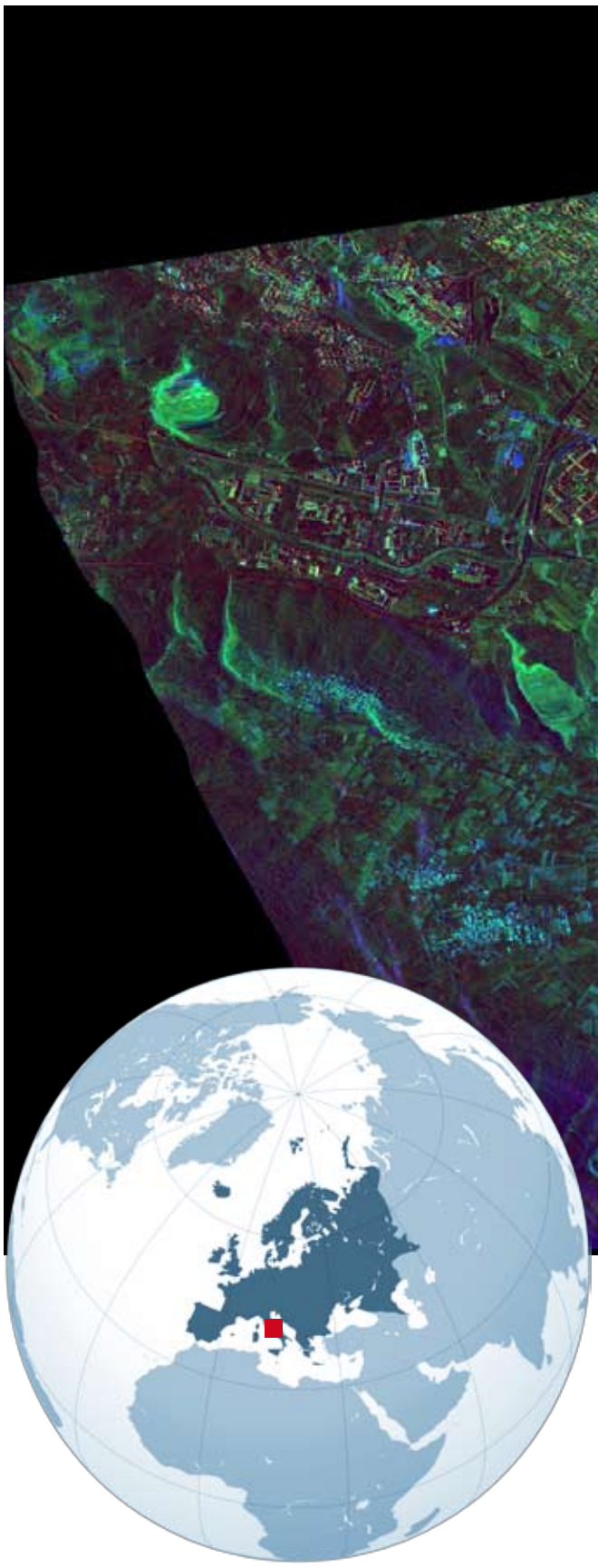


Figura 111 (arriba): Superposición de dos imágenes radar (SAR) adquiridas por la constelación COSMO-SkiMed antes y después del terremoto de L'Aquila (Italia), de intensidad 6,7 en la escala de Richter. La previa se tomó el día 22 de marzo de 2009 y la posterior el día 9 de abril de 2009. Las zonas verdes se han mantenido estables. En azul se observan las zonas que han sufrido daños, más o menos significativos, a consecuencia del terremoto. Hubo 294 muertos.
Fuente: Agenzia Spaziale Italiana

Figura 112 (derecha): Fusión de dos nuevas imágenes SAR COSMO-SkiMed antes y después del terremoto de L'Aquila (Italia). La imagen previa al seísmo ha sido coloreada, artificialmente, en rojo. La imagen posterior (7 de abril de 2009) ha sido coloreada en azul. Las áreas blancas son zonas que no han sufrido transformaciones. Sin embargo, los puntos rojos son puntos que aparecen en la imagen previa y no en la posterior. Lo más probable es que se trate de edificios que han colapsado como consecuencia del seísmo. En colores azules y verdes se observan los objetos que aparecen en la segunda imagen y no en la primera. Se trata de los elementos que han sufrido un desplazamiento significativo de su posición geográfica.
Fuente: Agenzia Spaziale Italiana

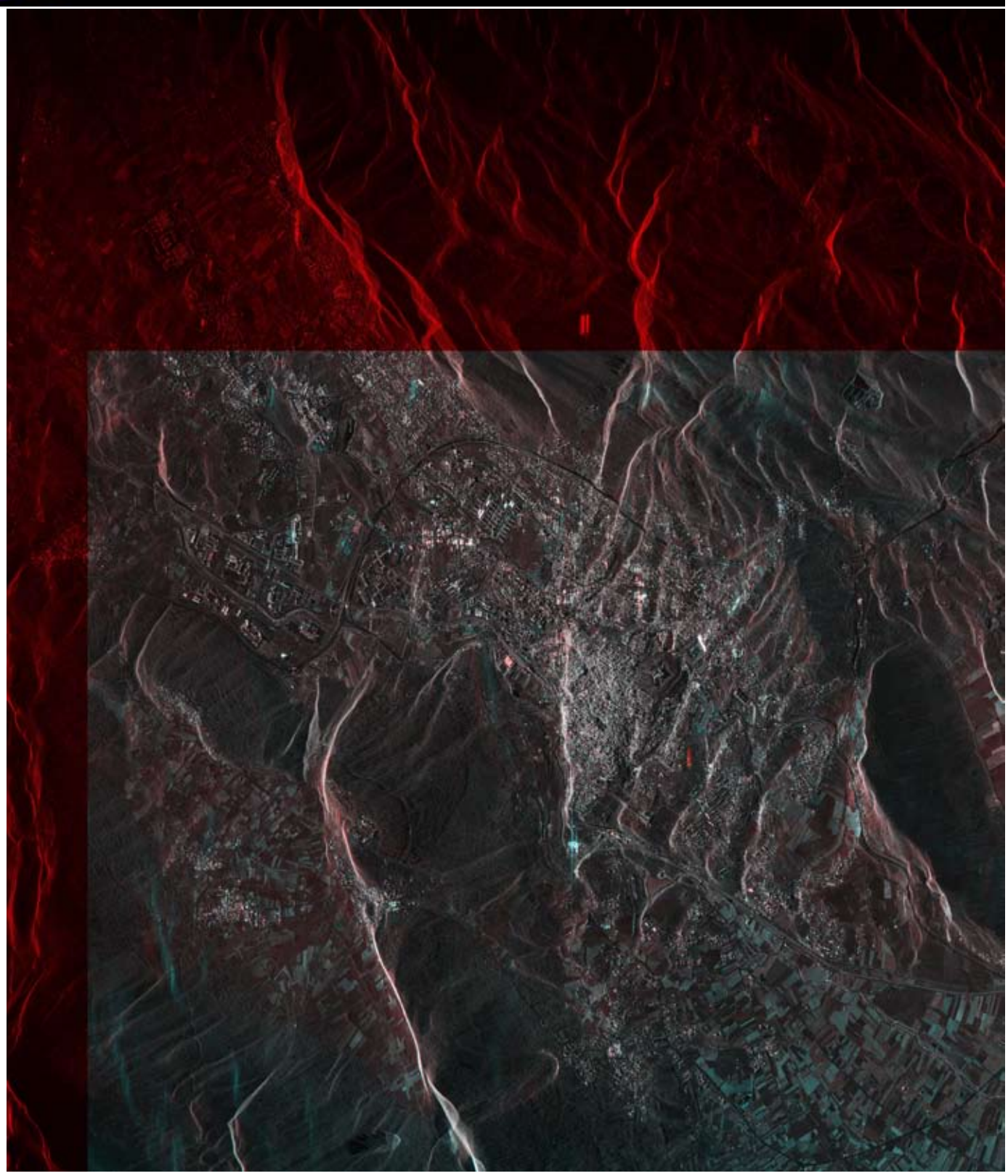






Figura 113 (arriba): Imagen adquirida por el satélite GeoEye-1 sobre el centro urbano de Puerto Príncipe, la capital de Haití, el 13 de enero de 2010, un día después de la ocurrencia del terremoto, de magnitud 7,3 que ha asolado al país. La primera sacudida fue seguida de tres réplicas con magnitudes comprendidas entre 5 y 6, según la escala de Richter. El epicentro se localizó a 15 km al suroeste de Puerto Príncipe. Incluso se activó una alerta por tsunami. El Centro de Advertencias por tsunamis de Estados Unidos registró una marejada en el fondo oceánico y en la superficie que afectó a la República Dominicana.

La imagen evidencia la extensión e intensidad de los daños producidos. Las calles estaban cubiertas por los escombros de los edificios cuyas estructuras habían colapsado. El Palacio Nacional, localizado en Champ Mars en el centro de la imagen, en color blanco, se encontraba muy dañado. La nave central del palacio estaba hundida. En la zona sur de la misma manzana, la mitad de las viviendas de una misma hilera se habían desplomado. Otros edificios singulares como algunos ministerios, la sede de Naciones Unidas o la catedral también se vieron afectados. Las personas, los hospitales de campaña y los puestos de emergencias se concentraron en las plazas, espacios abiertos y estadios. Además, la catástrofe motivó el colapso de innumerables edificios residenciales y de oficinas, así como hospitales, hoteles, supermercados y centros comerciales.

Las primeras estimaciones y valoraciones realizadas por expertos de la Unión Europea y de la comunidad internacional señalaron cifras preocupantes: 200.000 muertos, 250.000 desaparecidos y cuantiosas pérdidas materiales.

Fuente: http://geoeyemediaportal.s3.amazonaws.com/assets/images/gallery/ge1/hires/haiti_01_13_10.jpg



Figura 114 (izquierda): Vista oblicua del Palacio Nacional tomada el día 13 de enero de 2010 desde helicóptero, por la Delegación de la Cruz Roja Española, durante un vuelo de reconocimiento para la evaluación de daños y coordinación sobre el terreno.

Fuente: Cruz Roja Española

5.1.5. DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

Los deslizamientos de tierras, a veces llamados deslizamientos de laderas o de taludes, pertenecen a la categoría de riesgos naturales originados por procesos dinámicos de la superficie terrestre. Según Cifuentes *et al*., (1993), un deslizamiento es un tipo de proceso gravitacional caracterizado por la existencia de un plano sobre el que se produce el movimiento. Aunque pueden producirse de forma lenta, habitualmente se trata de desplazamientos violentos de grandes volúmenes de tierra y rocas. Se habla de deslizamientos cuando capas enteras de terreno se mueven sobre el material firme que sirve de sustrato. En su movimiento descendente pueden seguir uno o varios planos de corte del terreno.

Los factores que determinan su ocurrencia suelen ser variados. Entre otros, normalmente influyen las pendientes elevadas, el tipo de litología y de suelos del sustrato, las precipitaciones abundantes, la orientación de las grietas, la actividad sísmica y volcánica, así como otros mecanismos naturales y humanos (cambios en la cobertura vegetal , tales como repoblaciones forestales o deforestación, incendios forestales, excavaciones y actividades mineras o construcción de infraestructuras viarias, por ejemplo), capaces de mitigar o acentuar los procesos gravitacionales.

Por lo general, las zonas montañosas con pendientes fuertes son las más proclives a sufrir deslizamientos. En las regiones lluviosas, los materiales suelen estar fuertemente meteorizados y el nivel freático suele estar cerca de la superficie. Ambas condiciones suelen ser, de forma sinérgica, desencadenantes de los deslizamientos. Incluso, este fenómeno puede ocurrir en regiones semiáridas tras un periodo de violentas precipitaciones. Las lluvias intensas son el principal factor que incide sobre la ocurrencia de deslizamientos en España. Se estima que, anualmente, en nuestro país los deslizamientos producen unas pérdidas económicas de 180 millones de euros (Suárez y Regueiro, 1997).

A pesar de ello, los expertos reconocen el efecto negativo de algunas acciones antrópicas sobre los deslizamientos. Los movimientos de tierras y excavaciones, especialmente los desmontes, que se hacen para construir infraestructuras viarias (carreteras, ferrocarriles), hidráulicas (presas), extractivas (minas a cielo abierto) y edificaciones, entre otras, rompen los perfiles de equilibrio de las laderas y provocan deslizamientos. Es frecuente que, en las tareas de desmonte, se retiren los materiales de la base de la pendiente, que es la zona más vulnerable ante el riesgo de deslizamiento.

Figura 115: Imagen, en color natural, adquirida el día 9 de enero de 2009 por el satélite EO1 de la NASA. La imagen capta un extenso deslizamiento de ladera ocurrido cinco días antes en Alta Verapaz (Guatemala), a unos 200 km. al norte de la capital. En la parte centro-izquierda de la imagen, entre las nubes, se observa la mancha alargada, en el sentido de la pendiente, de color beige que ha abierto un gran claro en la espesa masa boscosa, de color verde. Miles de toneladas de rocas y derrubios se han deslizado ladera abajo, sepultando una estrecha carretera que discurre de oeste a este (línea de color marrón en el centro de la imagen). Treinta personas perdieron la vida y se contabilizaron varias docenas de desaparecidos.

Cortesía: Jesse Allen, NASA EO-1 Team









Figura 116: Imagen ALI, en color natural, adquirida el día 17 de junio de 2009 por el satélite EO1 de la NASA. La imagen muestra la huella de un deslizamiento de ladera ocurrido doce días antes en una zona montañosa de la región de Chongqing, en el sur de China. En el centro norte de la imagen, se observan los efectos del deslizamiento sobre el paisaje con una forma alargada, de color beige, que contrasta claramente con el color verde de la zona forestal de su entorno. No están claros los motivos del colapso de la ladera. El deslizamiento movilizó 12 millones de m^3 de material, sepultando numerosas viviendas, dos carreteras que atraviesan la zona y atrapando a docenas de mineros que trabajaban en una mina de mineral de hierro cercana. Las intensas lluvias de los días posteriores obligaron a suspender temporalmente las tareas de rescate. Aún permanecen desaparecidas 64 personas, según informes de las autoridades locales. Además, el deslizamiento ocasionó el corte del suministro energético como consecuencia de los daños ocasionados a las infraestructuras.

Cortesía: Jesse Allen, NASA EO-1 Team

Para evitar los deslizamientos, suelen ejecutarse algunas medidas de corrección y/o mitigación, que contribuyen a reducir el riesgo de ocurrencia. Las más habituales, son técnicas de ingeniería para la estabilización de taludes o para facilitar el drenaje en distintos puntos de la ladera, disminuyendo así la capacidad de arrastre del agua.

Es frecuente que la configuración típica de un deslizamiento, desde una perspectiva vertical, tenga la forma de una concha o cuchara. En las fotografías aéreas y en las imágenes de satélite suelen apreciarse de esta manera.

Uno de los peores deslizamientos de tierra ocurrió, en 1974, en el valle del río Mantaro, en los Andes peruanos (Hutchinson y Kojan, 1975). Los materiales deslizados por la ladera represaron el río, originando un embalse eventual que ocasionó la inundación de granjas, tres puentes, y unos veinte kilómetros de carretera. Casi 500 personas de la localidad de Mayunmarca y de sus alrededores perdieron la vida.

Ante la importancia de este tipo de riesgo, cada vez se presta más atención a la recopilación de la información necesaria para evaluar el peligro de deslizamientos en un contexto de planificación del territorio. Su objetivo es localizar las áreas más susceptibles a deslizamientos y, en ellas, implantar los usos del suelo más adecuados de manera que se reduzcan los riesgos.

En este sentido, las técnicas de zonificación ambiental y de usos del suelo son muy útiles para el planificador. En la literatura están descritas distintas metodologías estandarizadas para la determinación de la capacidad de uso de las tierras (FAO, 1976; USDA, 1961), en función de la combinación de factores biofísicos (topográficos, edáficos, climáticos y riesgo de erosión) y de las limitaciones que los mismos provocan sobre los suelos.

En resumen, la Teledetección espacial ha demostrado su capacidad para la detección de los deslizamientos de ladera mediante el análisis multitemporal de los ecosistemas a través de imágenes de satélite (Paolini *et al*., 2002), su impacto sobre los bosques y su relación con el proceso del cambio climático, especialmente con el incremento de las precipitaciones registradas.

5.2. OTROS FENÓMENOS NATURALES

Como se decía en el inicio del capítulo 5, se mostrarán, en este apartado, otro tipo de fenómenos naturales que llaman la atención por las dimensiones que poseen y por sus efectos sobre la salud o sobre los sistemas de navegación aérea y marítima, como las tormentas de arena relacionadas con los grandes desiertos del mundo. Asimismo, se mostrarán algunas grandes geoformas o megaformas, que son claramente visibles desde el espacio. Desde esta perspectiva global, se comprenden mejor sus formas y sus estructuras.

5.2.1. TORMENTAS DE ARENA

Las tormentas de arena son fenómenos meteorológicos que se originan, frecuentemente, en los grandes desiertos de la Tierra y que afectan a los territorios próximos a ellos e, incluso, a zonas muy alejadas, geográficamente.

En ocasiones, se habla también de tormentas de polvo cuando el tamaño de las partículas en suspensión es inferior a las 100 micras.

Suelen producirse en el desierto del Sáhara, en Arabia, en el desierto del Gobi, en las zonas desérticas del noroeste de China y en otras regiones áridas y semiáridas del planeta como en Australia y en las extensas llanuras de Norteamérica.

Suelen ocurrir en primavera y verano y, en ocasiones, en invierno. La arena del Sáhara se levanta cuando el aire cálido del desierto choca con el aire más fresco de la región del Sahel. Éste levanta las partículas de arena y los intensos vientos alisios, que soplan desde el Este, las transportan, a través del Atlántico Norte, hacia el oeste, alcanzando el archipiélago canario y llegando hasta el Caribe y América Central y del Norte.

Según algunos estudios presentados en el Congreso de la Unión Geográfica Internacional (Glasgow, 2004), se estima que la cantidad de arena y polvo que se traslada, en suspensión, en la atmósfera de forma global, está comprendida entre 2.000 y 3.000 millones de toneladas anuales.

Entre las principales consecuencias o efectos que poseen las tormentas de polvo y arena pueden citarse las siguientes:

1. Las partículas de polvo, más ligeras, pueden ascender a alturas comprendidas entre 5.000 y 7.000 m. y, como se ha dicho, se trasladan a distancias superiores a los 1.000 km. Las tormentas de arena pueden durar hasta 5 y 6 días. Durante ese periodo, la visibilidad se reduce de forma significativa, dificultando la navegación aérea.
2. Es un fenómeno que contribuye a la contaminación o, al menos, a la turbidez del aire.
3. Como consecuencia de la dispersión de la luz en la atmósfera por el abundante contenido de partículas, se genera un llamativo efecto óptico sobre los atardeceres y amaneceres en los países del Caribe y en otros países como Australia.
4. Alteran la luminosidad de los casquetes polares.
5. Cuando afectan a áreas pobladas de Europa y América, suelen provocar episodios alérgicos y crisis asmáticas en muchas personas, sobre todo en aquellas que padecen problemas crónicos respiratorios.
6. Debido a la intensidad del fenómeno, se pierde la capa superior del suelo en las zonas subdesérticas. Así pues, produce pérdidas y erosión del suelo en las zonas generadoras de este tipo de tormentas, contribuyendo al proceso de desertización.
7. Cuando las partículas de polvo o arena se precipitan sobre el terreno, en las zonas receptoras, normalmente salinizan el suelo.
8. A consecuencia de ello, en ocasiones, empobrecen la agricultura y la ganadería que soportan esos suelos.
9. Por el contrario, son una fuente importante de minerales para las plantas de la pluvisilva amazónica, escasos en esas zonas.
10. Por último, el polvo y la arena influyen sobre el crecimiento del plancton en las zonas mediterránea y oeste y norte del Océano Atlántico. Ello se debe al aporte de las sustancias nutritivas minerales esenciales para el plancton.

Además, los investigadores se encuentran ante un debate científico generado en relación a las tormentas de arena. Según expertos de la Universidad de Wisconsin, en base a estudios de una serie histórica de imágenes de satélite desde 1982 a 2005, las tormentas de arena generadas en el desierto del Sáhara son las reguladoras de la actividad de huracanes en el Océano Atlántico. Se ha constatado una relación inversa entre ambos fenómenos, de tal manera que puede decirse que cuanto mayor cantidad de polvo del desierto exista sobre el Atlántico, se producirán menos huracanes.

Apuntan a la importancia de tres mecanismos, complementarios, que pueden explicar esta relación inversa. En primer lugar, la introducción de aire seco en un sistema de tormenta puede causar corrientes descendentes, bloqueando la elevación de ráfagas de aire, necesarias para alimentar un huracán. En segundo lugar, los vientos de nivel medio que acompañan al aire del Sáhara causan una desviación de las corrientes. Un cambio en la dirección, combinada con la altitud, evitaría que se formaran las corrientes de chorro, típicas de las tormentas. En tercer y último lugar, el polvo absorbe el calor en el aire, lo cual estabilizaría las condiciones y evitaría la formación de tormentas.

Otras investigaciones apuntan a la influencia de este elemento contaminante del aire sobre el clima y sobre otros ecosistemas. Señalan que, por sus características físicas, las partículas de polvo reducen el tamaño de las gotas de lluvia e inhiben la formación de nubes de gran desarrollo vertical, generadoras de precipitaciones, favoreciendo así los procesos de sequía. Como el polvo viene cargado de hierro, sílice y sal, además de otros minerales, hongos y bacterias, puede incrementar la salinización de los suelos, y propiciar la aparición, en los océanos, de las denominadas mareas rojas o concentraciones masivas de algas muy tóxicas, causantes de la muerte de diferentes organismos marinos.

En la Universidad de Liverpool, otros investigadores centran sus estudios en la relación entre las tormentas de arena del Sáhara y determinados procesos biológicos en el Atlántico Norte. Señalan que las tormentas de arena del Sáhara son responsables, en gran medida, de las significativas diferencias que existen entre el Atlántico Norte y el Atlántico Sur

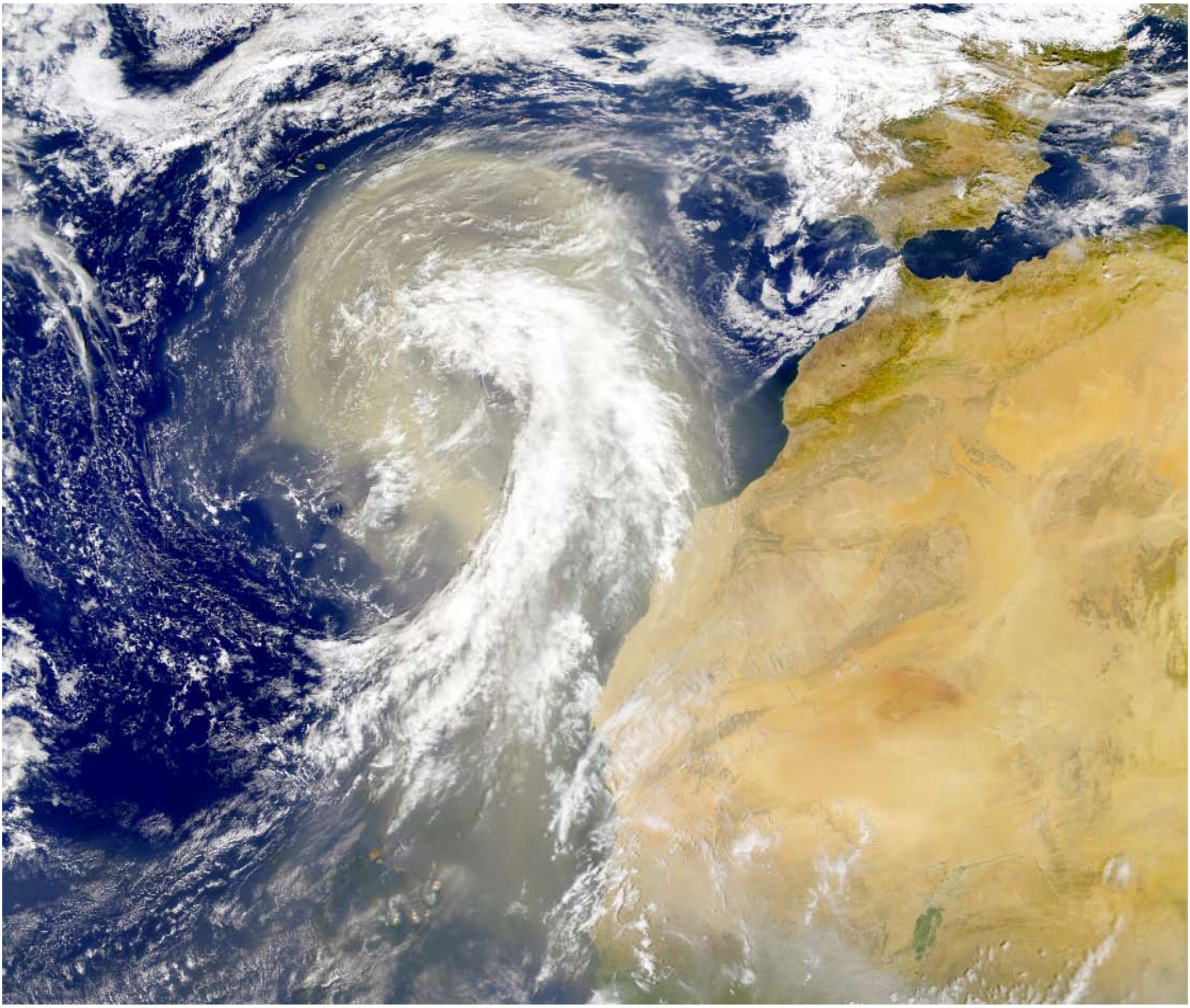




Figura 117: Imagen adquirida el día 1 de noviembre de 1998 por el sensor oceanográfico SeaWIFS, destinado a estudiar el color de los océanos.

Se aprecia la gran tormenta de arena que se extiende por el Atlántico Norte y que afecta, en el momento del paso del satélite Orbview-2, a las Islas Canarias. Obsérvese las grandes dimensiones de la tormenta, tan grande como la Península Ibérica.

Como se indica en el texto, esta gran nube de polvo y arena se genera en el desierto del Sáhara y es transportada por los vientos alisios hacia el Caribe y América del Norte. Con esta situación se reduce notablemente la visibilidad y se dificulta la navegación aérea.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov

en cuanto a su contenido en cianobacterias. Como ya se ha visto, el Atlántico Norte es una de las zonas habituales de distribución del polvo y arena aportados por las tormentas del desierto. Según estos estudios, el polvo posibilita al fitoplancton utilizar el fósforo orgánico transportado. Este polvo no llega a las regiones del Atlántico Sur. Al no disponer de suficiente hierro, el fitoplancton es incapaz de utilizar la materia orgánica por lo que no crece con tanto éxito.

Aunque el Atlántico Norte es la zona de mayor impacto de las tormentas de arena en el hemisferio occidental, éstas también se producen en otros lugares del mundo. En septiembre de 2009, una gran tormenta de arena cubrió los cielos de Sidney. Se dice que ha sido una de las peores en los últimos 70 años. Tenía una extensión de más de 500 km de ancho por 1.000 km de largo, cubriendo buena parte del estado de Nueva Gales del Sur y de otros estados vecinos. Incluso afectó a Nueva Zelanda. El polvo y la arena transportados procedían del desierto del centro de Australia.

En el interior de Estados Unidos también son conocidas las tormentas de polvo. En 1930, una gran sequía originó un fenómeno, conocido como *"Dust Bowl"*, identificado por una serie de tormentas de arena. Se dice que fue uno de los desastres ecológicos más importantes del siglo XX.



Figura 118 (izquierda):

Imagen SeaWIFS captada el día 11 de febrero de 2001.

Se aprecia una gran tormenta de arena que se desplaza desde el noroeste del continente africano hacia las Islas Canarias, en el centro de la imagen, y hacia el oeste del Atlántico Norte.

Es interesante observar los remolinos y ondas que forma la tormenta a sotavento de los elevados relieves de las Islas Canarias, en su cara norte, especialmente en las islas occidentales de mayores altitudes (Gran Canaria,Tenerife y La Palma).

Fuente: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center y ORBIMAGE

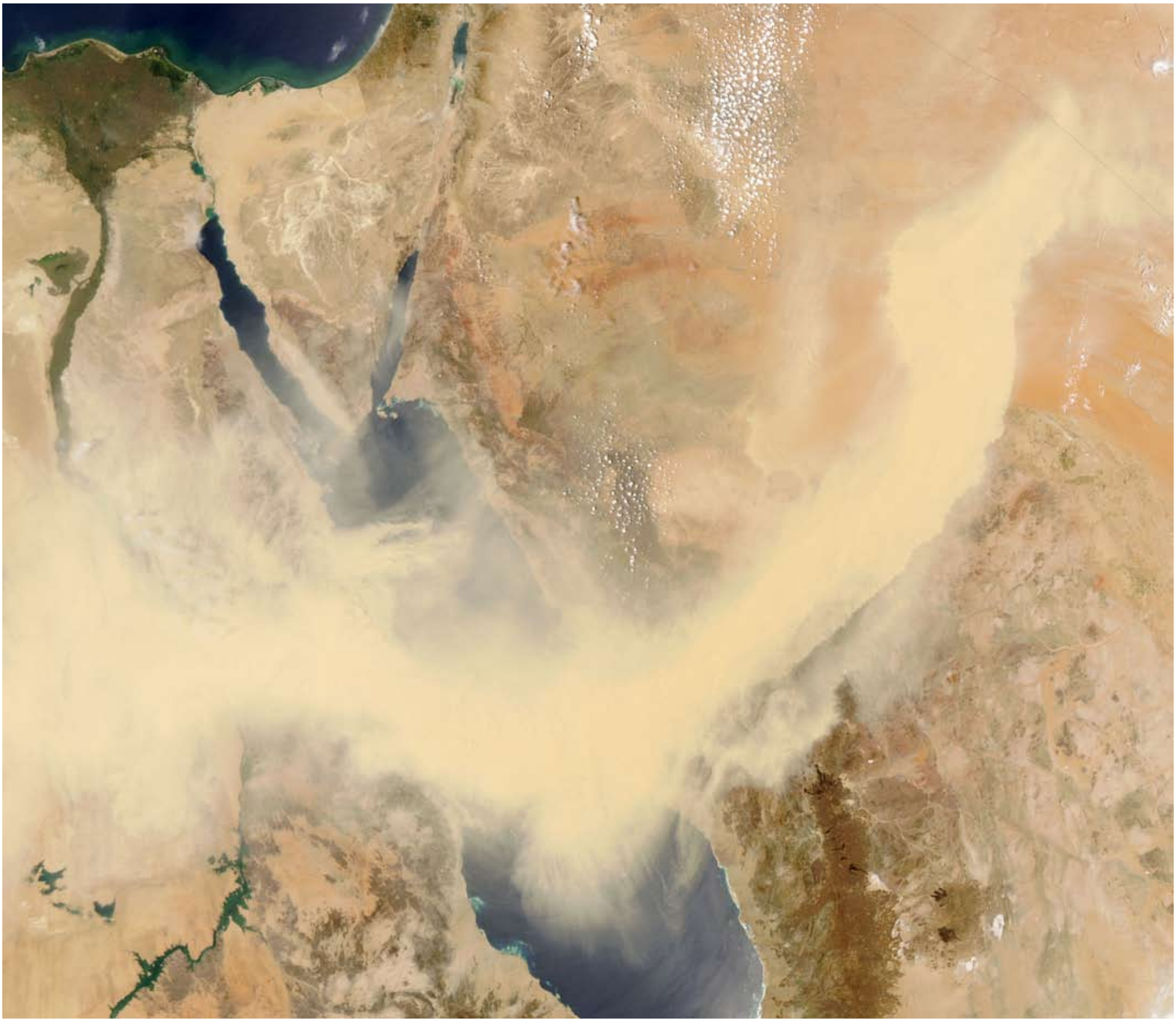




Figura 119 (página anterior, abajo): Imagen MODIS adquirida por el satélite TERRA el día 15 de enero de 2009. Se observa la tormenta de arena originada en el desierto de Arabia, al este del Mar Rojo, y que es arrastrada por el viento, en sentido inverso a las agujas del reloj, hacia el desierto de Nubia, en Sudán. Al oeste de la imagen se aprecia el contraste del lago Nasser o de Assuan (en color negro) y de los cultivos que bordean el Nilo (en color verde) frente a la inmensidad del desierto (en color amarillo).

Cortesía: MODIS Rapid Response,
NASA Goddard Space Flight Center

Figura 120 (arriba): Imagen MODIS captada por el satélite AQUA el día 13 de mayo de 2005.

Se visualiza en la imagen una extensa y alargada tormenta de arena que se extiende entre Arabia Saudí y Egipto, atravesando el Mar Rojo. Con la ayuda de imágenes de satélite complementarias, con mayor resolución temporal, como las de METEOSAT, es posible conocer el movimiento de esta masa de nubes de polvo. Se originó en Arabia Saudí, al sur de Jordania, y se desplazó hacia el oeste, hacia el sur de Egipto, dificultando la visibilidad y transportando importantes cantidades de sedimentos finos.

En la imagen, además, puede apreciarse la importancia del Nilo que se muestra como un corredor verde de vegetación, que fluye de sur a norte, en un contexto completamente desértico. Se puede observar el gran delta, con una forma de abanico de color verde, en la esquina noroeste de la imagen. Inmediatamente al norte, en la costa mediterránea, se visualizan los arrecifes de coral, en colores turquesas. Finalmente, es evidente la península del Sinaí que dibuja su silueta triangular sobre el mar Rojo, en el centro norte de la imagen. Pueden diferenciarse los golfos de Aqaba (al este de la península) y de Suez (al oeste de la misma).

Cortesía: Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA Goddard Space Flight Center



Figura 121: Imagen MERIS, captada desde el satélite Envisat en abril de 2008. Se observa la gran tormenta de arena que transporta el polvo, en suspensión, desde el desierto del Sáhara hasta el Océano Atlántico y afecta a países de la costa oeste africana como Mauritania, Senegal y Guinea.

Fuente: ESA

5.2.2. GEOFORMAS

El término geomorfología deriva de las palabras griegas, geos (Tierra), morfeé (forma) y logos (conocimiento). Así pues, etimológicamente significa el conocimiento racional de las formas de la Tierra. En la actualidad, se concibe a la Geomorfología como una subdisciplina de la Geografía, *"que tiene como objeto el reconocimiento, la clasificación y la explicación de las diferentes configuraciones que presenta la superficie externa de la litosfera, de cuya combinación resulta el relieve terrestre"* (Muñoz, 2000, p. 13).

La Geomorfología se apoya en otras subdisciplinas geográficas como la Climatología y la Hidrografía, así como en otras ciencias afines como la Geología, la Biología o la Edafología, con objeto de conocer mejor los factores bióticos y abióticos, endógenos y exógenos que, mediante su continua interacción, explican las formas del relieve.

Comenzó a desarrollarse en Estados Unidos, a finales del siglo XIX. Davis, un geógrafo y geólogo americano, es considerado el padre de la Geomorfología. Éste pensaba que los siguientes grupos de factores son los responsables de los procesos geomorfológicos y de la formación y evolución de las formas del relieve:

1. Factores geológicos: tales como la tectónica, la orogénesis y el vulcanismo. Son factores de origen endógeno y son considerados procesos constructivos.

2. Factores geográficos: se consideran propiamente geográficos aquellos factores abióticos de origen exógeno, tales como el relieve, el suelo, el clima y los cuerpos de agua. Éstos ayudan al modelado, favoreciendo los procesos erosivos.

3. Factores bióticos: tales como la vegetación y la fauna. Su efecto sobre el relieve es dispar. En ocasiones favorecen los procesos del modelado mientras que, en otras, contribuyen al proceso erosivo.

4. Factores antrópicos: Igualmente que los factores bióticos, la acción del hombre sobre el relieve es muy variable. Históricamente, su papel ha sido relevante en la pérdida de relieves a consecuencia de una inadecuada planificación del territorio. Algunos deslizamientos de laderas y la pérdida de suelo se han acelerado por la deforestación intensiva o por las prácticas agrícolas en zonas marginales con declives significativos que, de forma natural, deberían suponer un limitante para aquéllas. En otras ocasiones, la intervención del hombre es crucial para proteger relieves inestables. Algunas políticas de restauración y protección de cuencas hidrográficas son una buena muestra de ello.

De la interacción de estos elementos resulta el proceso morfogenético o modelado, dividido en tres procesos sucesivos: la erosión, el transporte y la sedimentación. Este proceso es, en gran parte, causante del modelado de la superficie terrestre.

Hay geoformas de grandes dimensiones, que sólo pueden apreciarse, en su conjunto, desde el espacio.





Figura 122 (arriba): Fotografía tomada por los astronautas de la Estación Espacial Internacional el 11 de diciembre de 2005. Se observa, en el centro de la imagen, Sierra Nevada (España). Al oeste de la misma, cubiertos de nieve, se localizan el Veleta (3.398 m) y el Mulhacén (3.478 m), el pico más alto de la Península Ibérica. Se trata de una sierra que forma parte del sistema montañoso Bético, formado durante la orogenia alpina, como consecuencia del choque de las placas africana y euroasiática. Sus abruptas pendientes están labradas por profundos barrancos que salvan ese importante desnivel en los escasos kilómetros que separan Sierra Nevada del Mar Mediterráneo, en la esquina sureste.
Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 123 (abajo): Imagen tridimensional en la que se han fusionado una escena Landsat, adquirida el 4 de mayo de 2001, y un modelo digital de elevaciones extraido de una imagen SRTM tomada desde el Space Shuttle. Se aprecia la falla de San Andrés, que recorre el estado de California, desde el noroeste, en la parte superior de la imagen, hasta el sureste, en la esquina inferior derecha. Separa dos dominios fisiográficos, el sistema montañoso de San Gabriel, al oeste, del desierto del Mojave, al este.
Cortesía de SRTM Team NASA/JPL/NIMA y Landsat 7 Science Team NASA GSFC/USGS



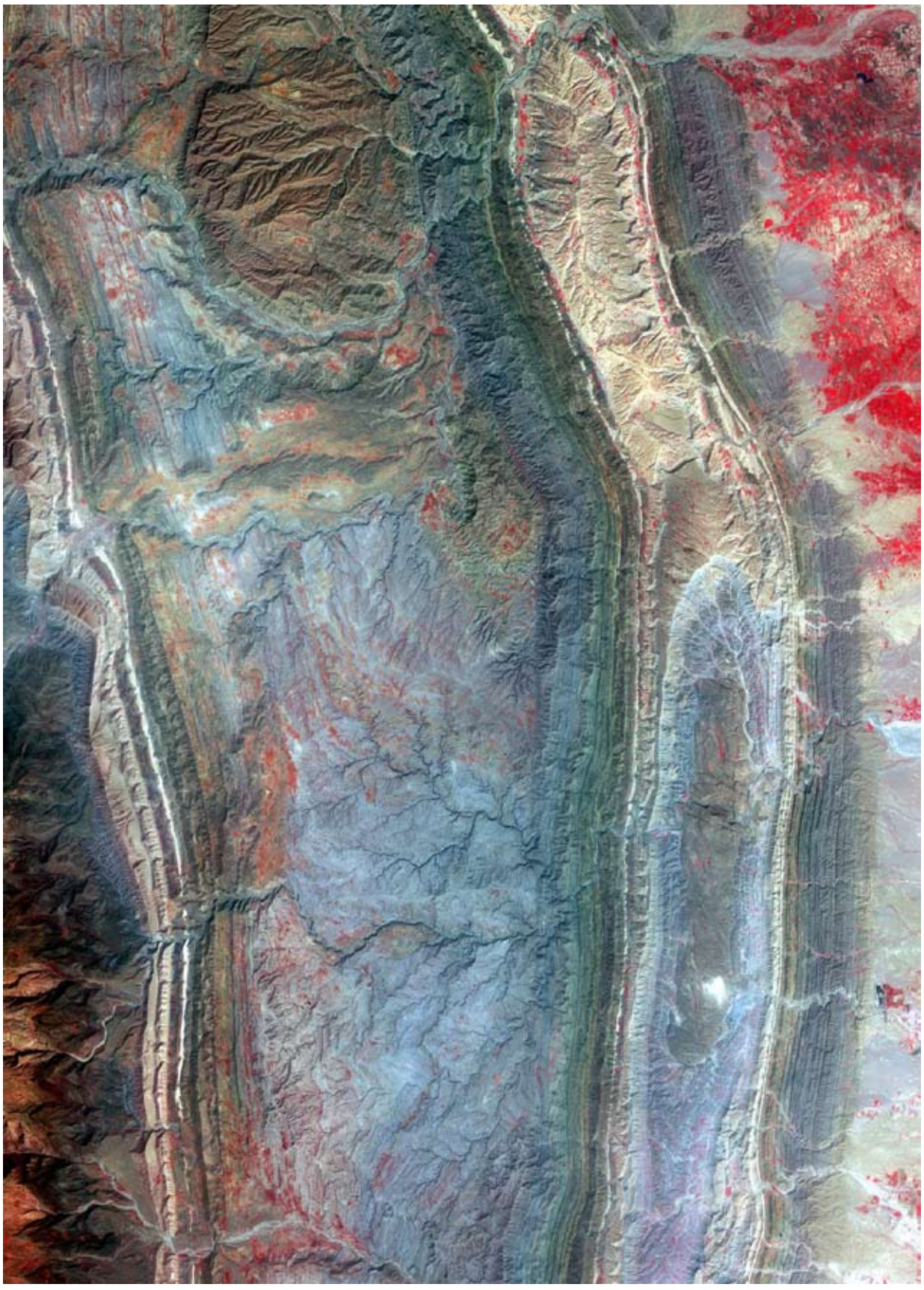




Figura 124 (izquierda): Imagen ASTER, en falso color, tomada el día 14 de octubre de 2001. Se aprecia el anticlinal de Zinda Pir, en los Montes Sulaiman (Pakistán), al oeste del río Indo.

Esta estructura, de rocas terciarias, ha sido formada por comprensión en el momento de la colisión entre la placa del subcontinente indio y la placa afgana, como consecuencia de la deriva de la primera hacia el norte.

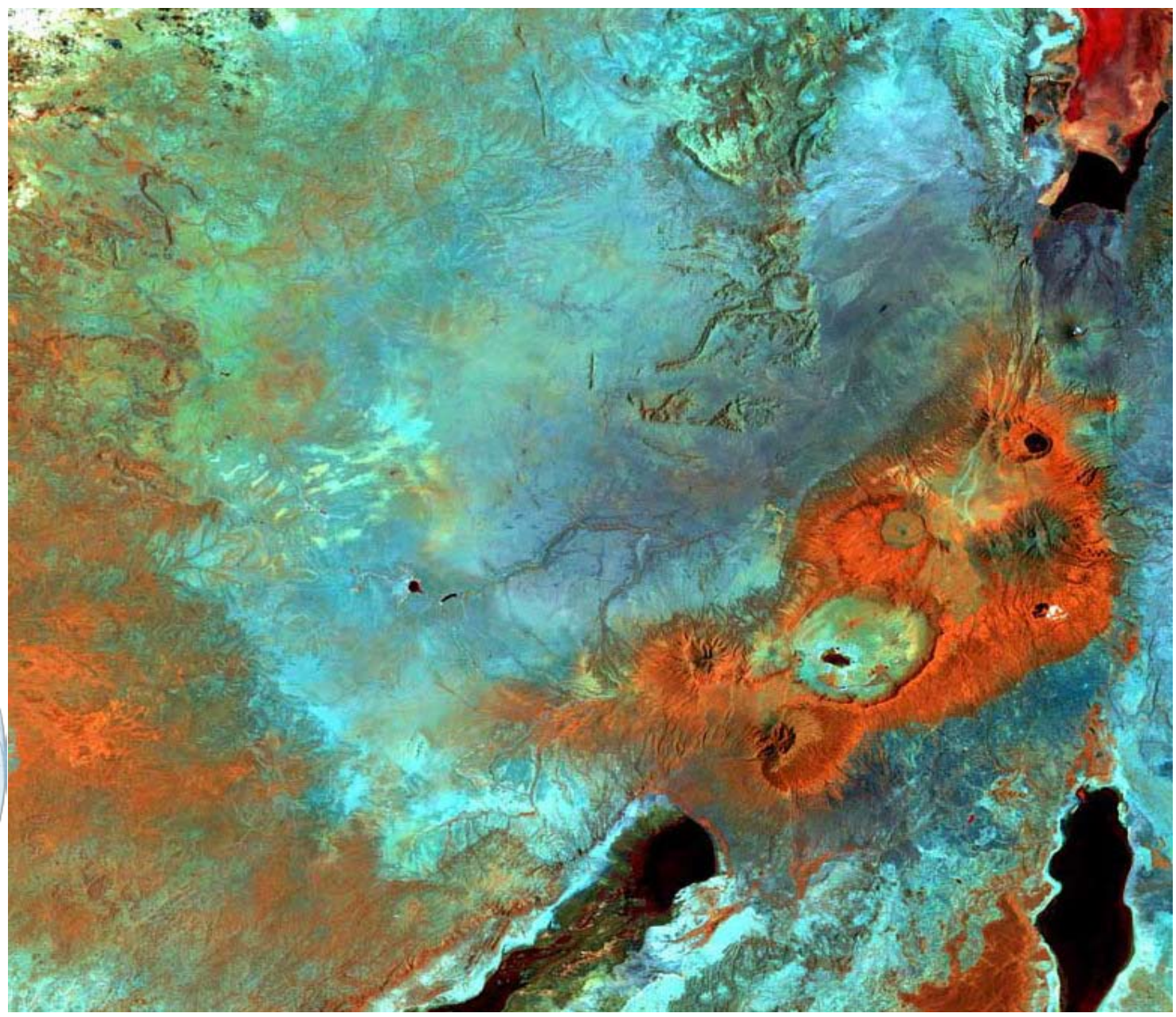
En la zona norte del anticlinal se ha descubierto un gran yacimiento de gas y se cree que toda esta estructura geológica es una gran reservorio de gas.

Fuente: METI/ERSDAC

Figura 125 (derecha): Imagen Landsat, en falso color (457=RGB), adquirida en agosto de 1995.

Se muestra el crater del volcán Ngorongoro (Tanzania) en el centro oriental de la imagen, acompañado de otros edificios volcánicos que dominan los lagos (en color negro) de Antron, al noreste, de Eyasi, al sur, y el lago Manyara, al sureste. El cuadrante noroeste está cubierto por las vastas llanuras del Parque Nacional del Serengeti (en color azul claro y tonos anaranjados).
Fuente: www.eurimage.com





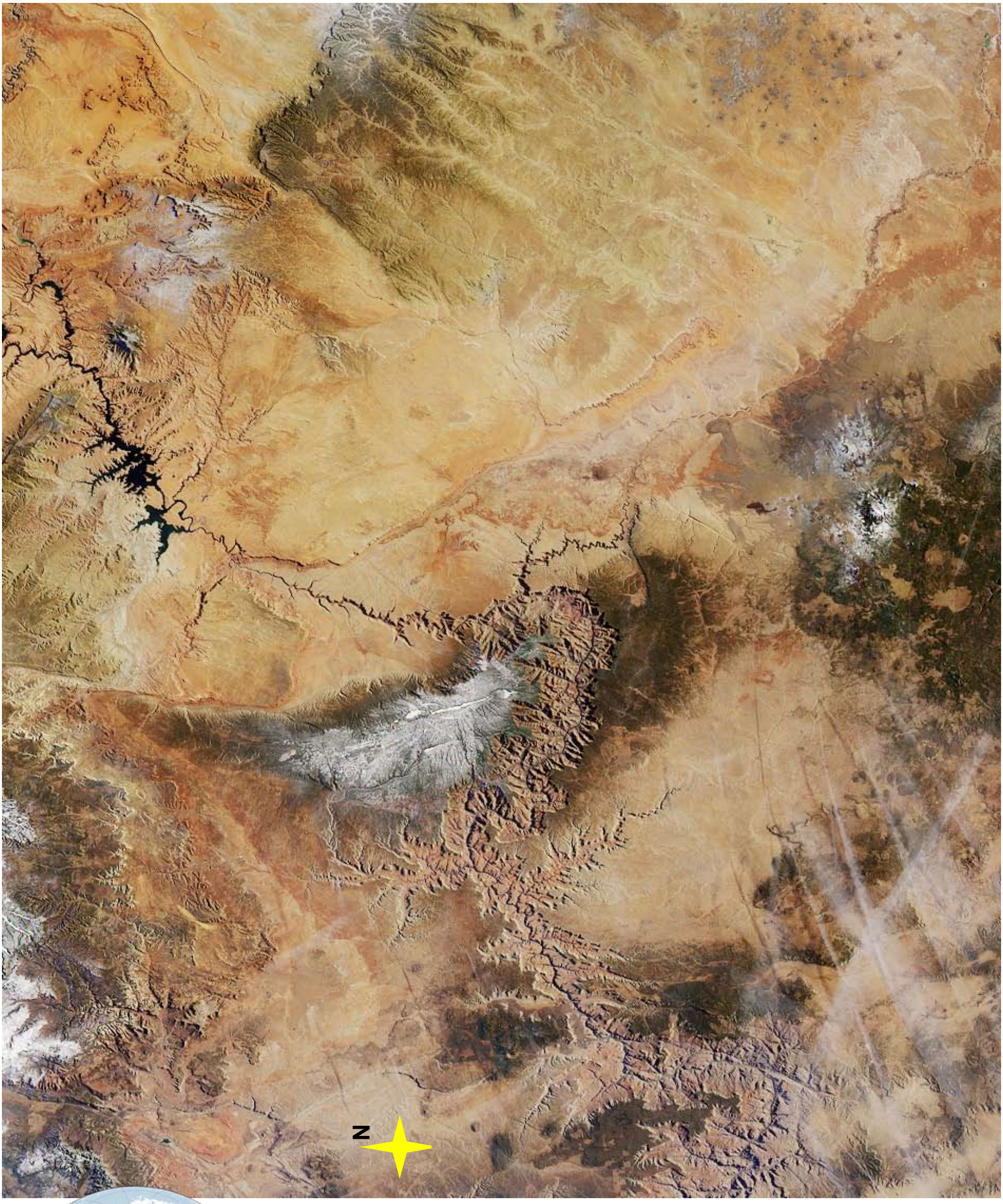




Figura 126: Imagen estereoscópica compuesta, en color natural, adquirida el 31 de diciembre de 2000 por la misión MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer). Para magnificar el aspecto tridimensional, el norte se encuentra a la izquierda de la imagen.

Desde el centro de la imagen hasta su parte inferior, al oeste, se aprecia el Gran Cañón que ha tallado el río Colorado, en el norte del estado de Arizona, en su paso hacia el Pacífico. En el cuadrante superior izquierdo de la imagen, en el noreste, se observa la magnitud del Lago Powell (en color negro). A la derecha, al sur, en el interior de la mancha de color verde oscuro, se encuentra uno de los picos de mayor altitud de la zona, el Humphreys Peak (3.861 m).

Fuente: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team.





Figura 127: Imagen ASTER adquirida el 2 de mayo de 2002. Se trata de una gran abanico aluvial formado en un medio árido de China, en la provincia occidental de XinJiang. Se ha generado en torno al cauce del Karamiran He, que discurre, intermitentemente en el borde meridional del desierto de Taklamakán, entre las cadenas montañosas de Kunlun, al oeste, y Altun, al este.

Los cauces son radiales en torno al vértice meridional del abanico. El color azul de los cauces de la mitad occidental indica que se trata de los que, aún, se encuentran activos.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team

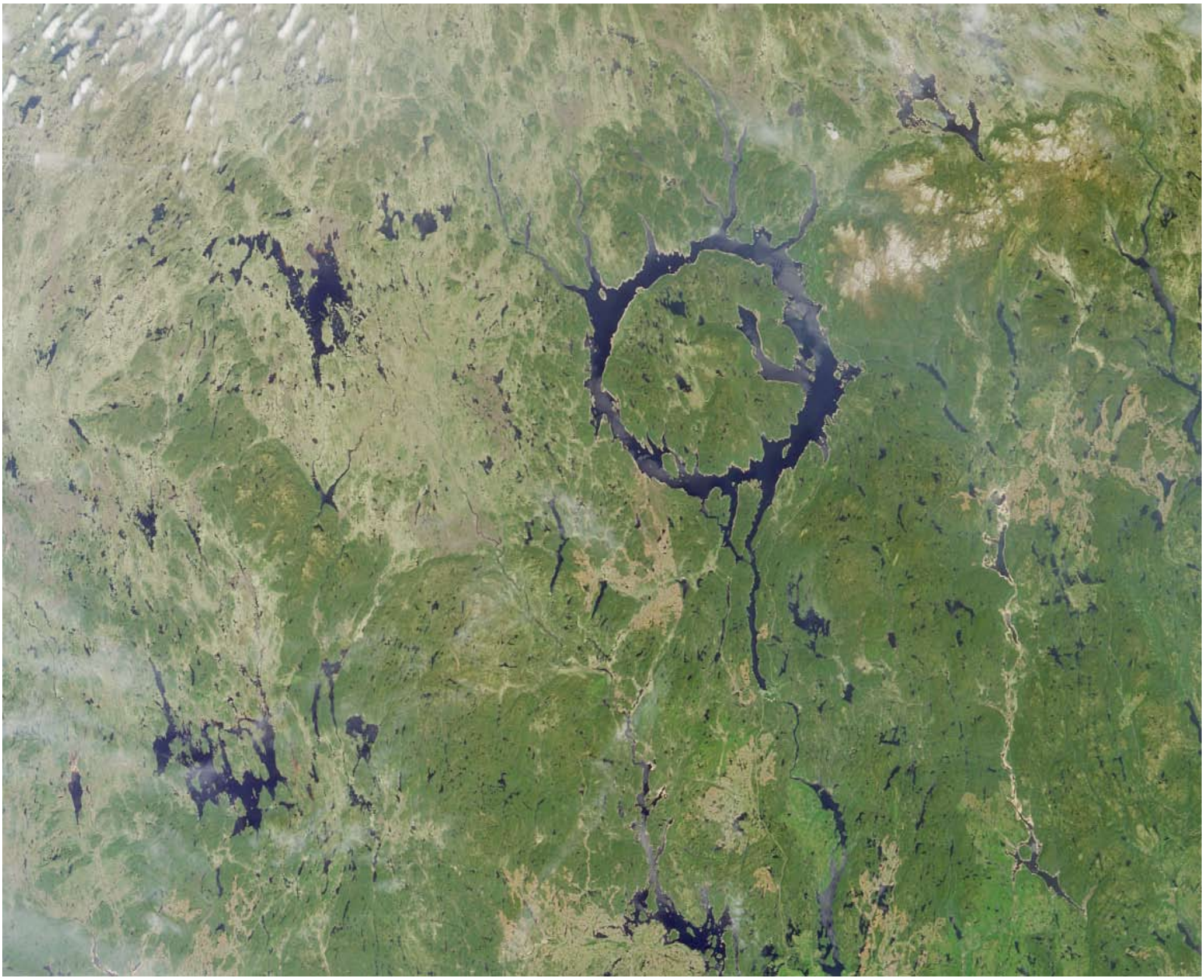




Figura 128: Imagen, en color natural, adquirida el 1 de junio de 2001 por la misión MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer). Se observa el Lago Manicouagan, en el norte de la provincia de Quebec, Canadá, al norte del estuario del río San Lorenzo.

Tiene una peculiar forma circular, diferente al resto de los lagos del entorno. Se trata de un lago cuyo origen se debe, según algunas investigaciones, al impacto de un asteroide de unos 5 km de diámetro que generó un gran cráter de unos 100 km de diámetro. Se cree que el impacto ocurrió hace unos 212 millones de años, hacia el final del periodo Triásico.

Las glaciaciones y otros procesos erosivos han reducido su diámetro hasta los 70 km. Aún así, el lago permanece gracias a la erosión diferencial practicada sobre unos materiales cristalinos y metamórficos más resistentes.

En la actualidad, el lago es conocido como una de las más importantes reservas de salmón de las provincias atlánticas de Canadá.

Cortesía: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team.

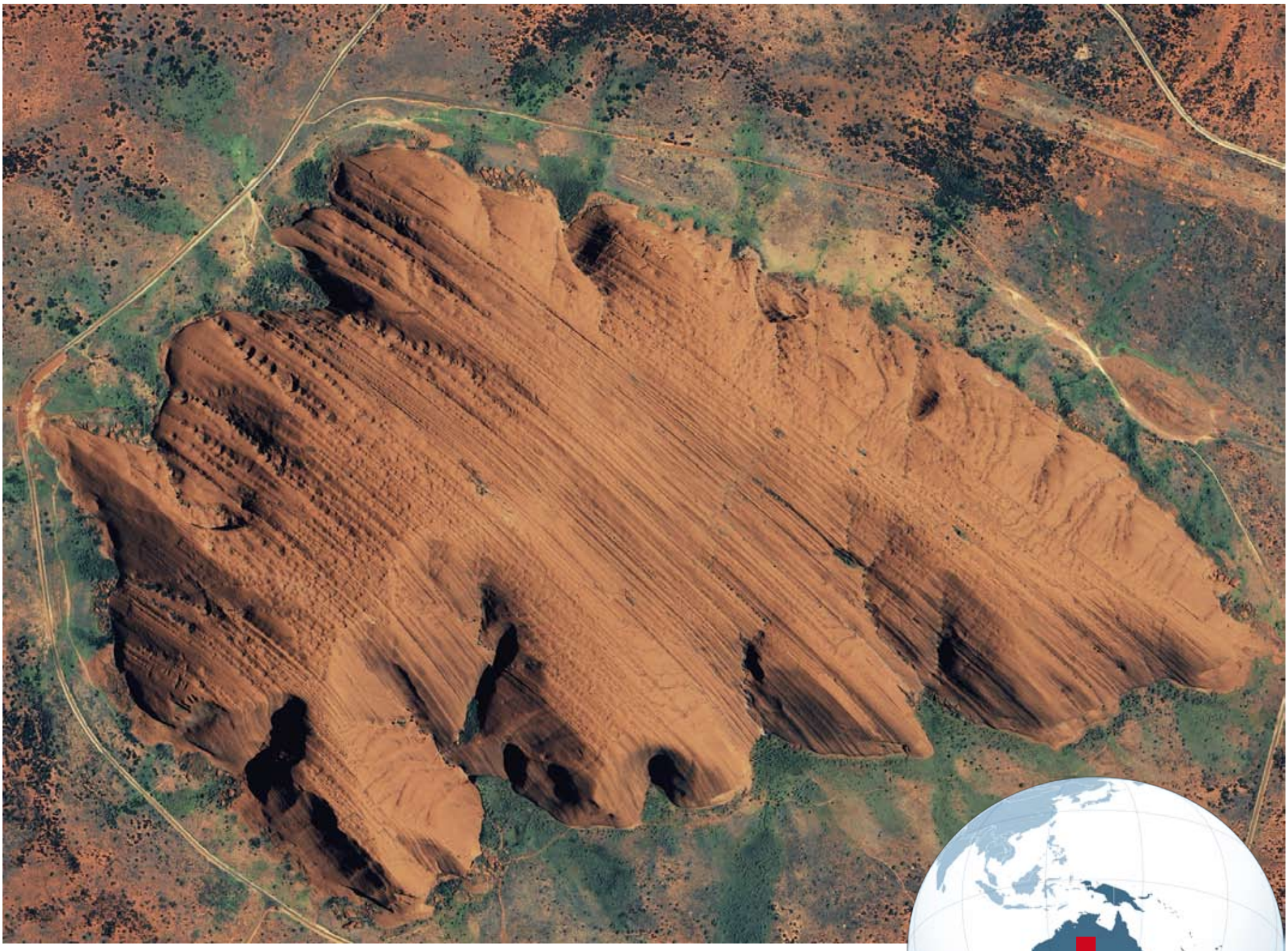




Figura 129 (arriba): Imagen Ikonos, tomada el 17 de enero de 2004. Se observa la magnitud de Ayers Rock, conocido también por el nombre de Uluru, el monolito más grande del mundo. Mide 3,6 km de largo por 2,5 km de ancho y tiene una altitud de 348 m. Se localiza en el centro de Australia, en el estado de los Territorios del Norte. Se trata de una gran roca arenisca, de edad precámbrica, sin fracturas que, dada la dureza de su composición, ha resistido a los agentes erosivos. Es un lugar sagrado para los aborígenes de Australia.
Fuente: Space Imaging



Figura 130 (izquierda): Perspectiva tridimensional generada mediante la fusión de una imagen ASTER y un modelo digital de elevaciones derivado de la misma. La imagen ha sido captada el día 14 de octubre de 2002 sobre el desierto costero de Namibia, en el entorno del Parque Nacional de Naukluft. Los vientos costeros han modelado las dunas de arena que se aprecian en la imagen. Algunas miden hasta 300 m. de altura.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



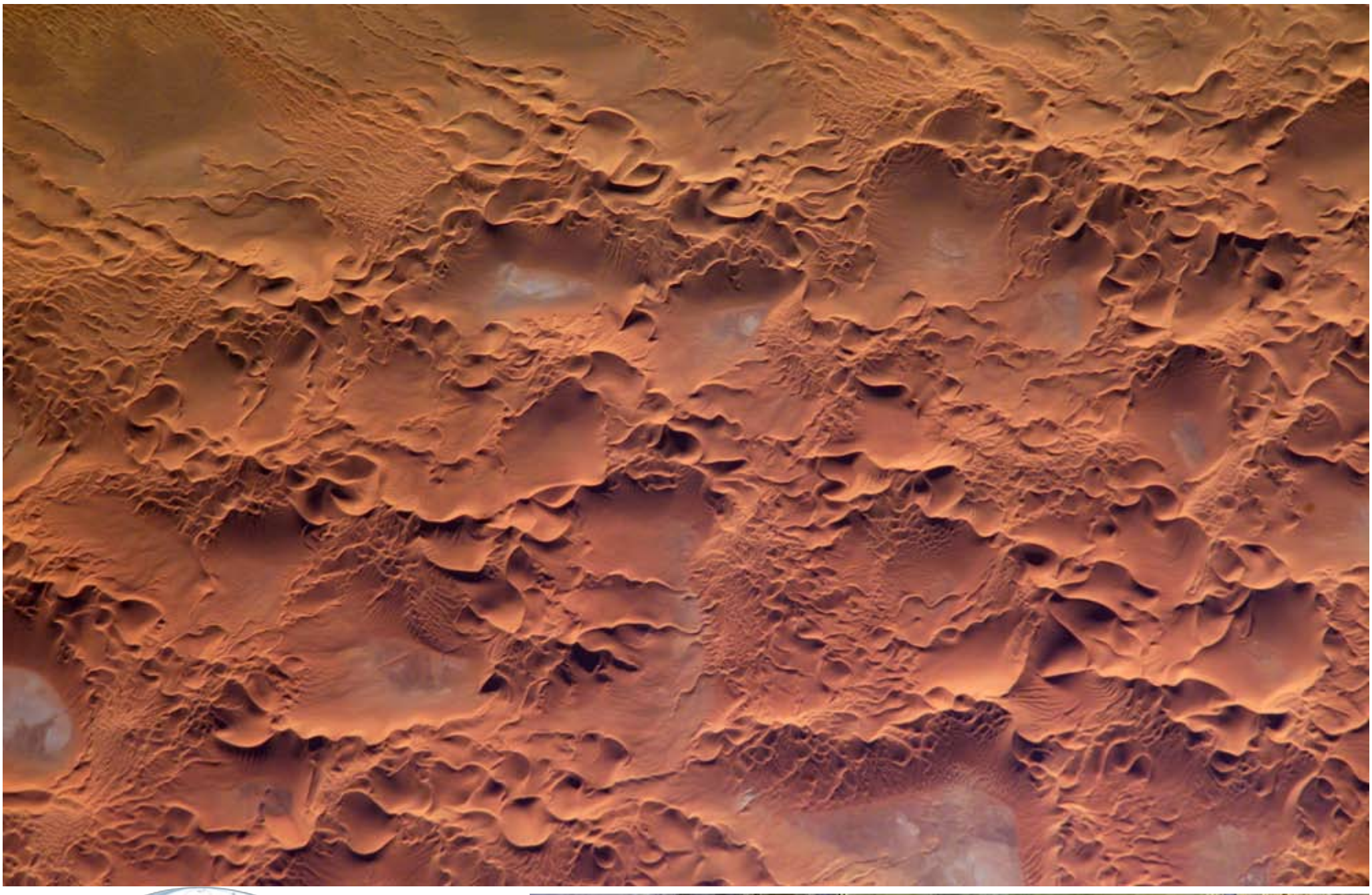




Figura 131 (arriba): Fotografía tomada, por los astronautas de la Estación Espacial Internacional, el día 16 de enero de 2005 sobre el área de Isaouane, en el este de Argelia. Forma parte del desierto del Sáhara. Se observa un gran Erg, también llamado mar de arena, formado por una gran cantidad de dunas móviles. La cresta de algunas indica que existe una dirección dominante de vientos mientras que la forma y orientación de otras sugiere que los vientos tienen direcciones cambiantes. El agua precipitada ocasionalmente se acumula en las hondonadas formadas entre dunas. Una vez que se evapora el agua, se acumulan sales que se observan en un color blanco-azulado. Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 132 (derecha): Imagen ASTER, en color natural, captada el 8 de agosto de 2001 sobre la cuenca de Tanezrouft, en el desierto del Sáhara, al sur de Argelia. Los sedimentos de edad Paleozoica han sido erosionados por el viento. Ahora quedan a la vista materiales de distinta naturaleza. Contrastan los colores amarillo, de las arenas, blanco, de las sales, y azul, de otros sedimentos. Fuente: METI/ERSDAC





Figura 133: Imagen MERIS, tomada desde el satélite Envisat, el día 24 de noviembre de 2004. Se trata de una imagen adquirida en modo de mejor resolución que proporciona un tamaño de píxel de 300 m. Dentro de las grandes manchas de color naranja-amarillo, se observa la rugosidad de los mares de dunas de Ubari y Murzuq, en la región de Fessan, al suroeste de Libia, en una zona próxima a la frontera con Argelia, en el gran desierto del Sáhara.

Fuente: ESA

Figura 134: Imagen ASTER, adquirida el 7 de octubre de 2000. Se observa una megaestructura localizada en Richat (Mauritania). Se encuentra en la vertiente meridional del sistema montañoso Dhar Adrar. Tiene un diámetro de 50 km. Siempre ha llamado la atención de los astronautas por sus dimensiones y por su llamativa forma circular en medio del desierto del Sáhara.

Inicialmente, se pensó que se trataba de una estructura resultante del impacto de un meteorito. Sin embargo, hoy se sabe que se trata de un gran anticlinal circular que ha quedado al descubierto por erosión. Las resistentes cuarcitas paleozoicas perfilan esta geoforma.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team







Figura 135: Imagen MERIS con la máxima resolución espacial, tomada desde el satélite Envisat, el día 24 de enero de 2004. Se observa la península de Florida y gran parte de Cuba, al sur, así como las Bahamas, al este de la imagen. Se aprecia la diferencia en la profundidad y calidad de las aguas. En color azul turquesa se muestran las aguas poco profundas del Caribe, al sur de Cuba, y del Atlántico, en torno a las Bahamas y a los Cayos de Florida.

Fuente: ESA

5.2.3. RÍOS Y MASAS DE AGUA

La importancia del agua, como uno de los elementos básicos del medio natural, es indudable. Existe cierto consenso para afirmar que el agua es un factor determinante que explica la organización del territorio y que condiciona su ordenación.

La Hidrología es la ciencia que se encarga del estudio de la distribución del agua, de su circulación y del conocimiento de sus propiedades físico-químicas.

La hidrosfera es la parte más característica y diferente de nuestro planeta. En la Tierra hay unos 1.365 millones de km^3 de agua (Berga, 2009), aunque el 97,5% es agua salada. La mayor parte del agua dulce renovable de nuestro planeta se encuentra en los lagos naturales. Se estima que existen unos 15 millones de lagos que ocupan en torno al 1,5% de la superficie terrestre. El volumen de las láminas de agua formadas por los lagos naturales es de unos 91.000 km^3, unas 13 veces mayor que el volumen de todos los embalses artificiales construidos por el hombre.

Los ríos almacenan unos 2.120 km^3 de agua y ocupan una parte pequeña de la superficie terrestre. Sin embargo, por sus cauces circulan las aguas provenientes del ciclo hidrológico que proporciona unos 40.000 km^3 de agua al año.

El hombre y las sociedades interaccionan con el agua de forma muy variada. Unas veces, los primeros son víctimas de las aguas como consecuencia del impacto de las inundaciones y riadas provocadas por las intensas lluvias asociadas al paso de un huracán o por el desbordamiento de embalses, lagos y ríos. Otras veces, son los hombres los que ocasionan un impacto sobre los recursos hídricos como consecuencia de una mala administración de los mismos, rebasando los periodos de reposición natural del recurso agua. Es el caso de la sobreexplotación de acuíferos subterráneos e, incluso, de reservorios de agua superficial. Otros casos, se manifiestan en forma de contaminación de corrientes y masas de agua continentales y marinas o en forma de una reducción de los glaciares y casquetes polares como resultado del calentamiento de la Tierra. Todos estos procesos, suelen traducirse en un incremento de la vulnerabilidad del recurso. Algunos de estos impactos los estudiaremos más adelante.

En este capítulo, vamos a realizar una exposición de distintas entidades hidrográficas, atendiendo a una clasificación muy elemental y descriptiva. Vamos a presentar distintos ejemplos de los grandes ríos del mundo y, especialmente, de sus deltas y, posteriormente, de algunos lagos y embalses significativos. Los glaciares los presentaremos en un epígrafe aparte. No hemos querido insistir en los océanos, porque ya fueron presentados, indirectamente, en el epígrafe dedicado a los huracanes.

A través de las imágenes espaciales seleccionadas, el lector podrá observar, aunque sea indirectamente, aspectos relacionados con la forma de las redes hidrográficas, con la distribución del recurso agua en el planeta o con la calidad de las aguas.

Hemos prestado especial atención a los deltas de los principales ríos del mundo porque suelen ser zonas de gran interés ecológico al tiempo que son zonas vulnerables. En ellas, o en sus proximidades, se concentran grandes aglomeraciones urbanas y zonas agrícolas ocupadas por cultivos intensivos. En los últimos años, parece corrobarse una tendencia creciente a las inundaciones, de manera que la vulnerabilidad de estas áreas va en aumento.

Según una investigación de la Universidad de Colorado, el 85% de los grandes deltas del mundo ha sufrido inundaciones porque se están hundiendo y les afecta más las crecidas de los ríos y el incremento del nivel del mar como consecuencia del calentamiento global.

La construcción de presas y el desvío de los cauces de los ríos en proyectos de irrigación, reduce la cantidad de sedimentos transportados hacia las desembocaduras, de manera que se limitan los aportes y rellenos de materiales en los deltas y, por tanto, se produce un hundimiento relativo respecto al nivel del mar. Entre los 33 deltas estudiados, los ríos más afectados son el Colorado, Nilo, Yangtzé y Mekong.

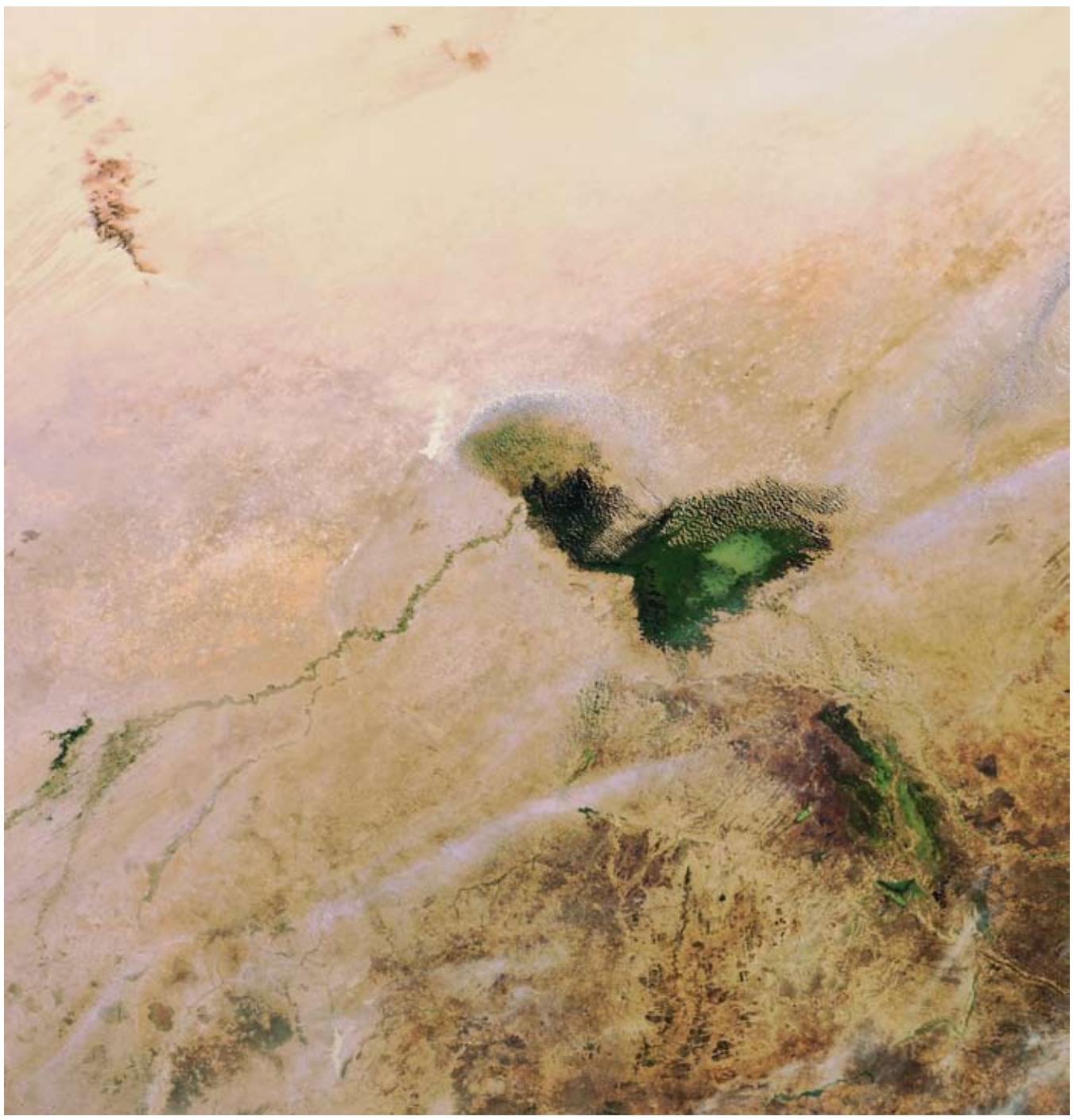


Figura 136: Imagen MERIS captada, el 19 de diciembre de 2007, desde el satélite Envisat sobre el lago Chad, África.

Como se verá, más adelante, el lago Chad está sufriendo un proceso de desecación muy severo como consecuencia de la reducción de las precipitaciones, en un ámbito geográfico árido, y del incremento de la demanda de agua, para diversos proyectos de nuevos regadíos.

En el centro de la imagen se aprecia el vaso del lago. La lámina de agua (en color negro) cubre escasas zonas del sector central. En el sureste del lago, el color verde claro se corresponde con una delgada lámina de agua muy eutrofizada. Las zonas de color verde oscuro están colonizadas por vegetación natural asociada a espacios lacustres. En el lóbulo norte del lago, se distingue el suelo desnudo del fondo del lago (en color amarillo), que no está cubierto ni por agua ni por vegetación.

Fuente: ESA





Figura 137 (arriba): Imagen adquirida el 3 de junio de 2004 desde la Estación Espacial Internacional, en color natural, sobre el delta del río Ebro (España). Su forma triangular, ligeramente redondeada, indica el equilibrio alcanzado entre los procesos de deposición de sedimentos y de erosión. En la zona costera de la punta del delta se observa una mancha formada por la capa de agua fresca aportada por el río Ebro que se superpone al agua salada del Mediterráneo, con distintas densidades. El Ebro es el río más caudaloso de España (caudal medio de 426 m³/s). Drena una cuenca de 85.362 km².

El delta está ocupado por humedales que sustentan una diversa avifauna. Se han llegado a censar más de 300 especies diferentes de aves. Desde 1983, esta zona ha sido declarada espacio natural protegido con el nombre de Parque Natural del Delta del Ebro. Junto a él coexisten campos de cultivo de arroz y frutales, principalmente, regados por una densa red de canales y acequias.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.



Figura 138 (derecha): Imagen tomada el 30 de enero de 2001 por el espectroradiómetro multiangular MISR de la NASA sobre el valle y el delta del Nilo. Tradicionalmente, se le ha considerado el río más largo del mundo, con una longitud de 6.756 km. Posee un caudal medio de 2.830 m³/s y drena una cuenca de 3.254.555 km², aproximadamente un 10% de la superficie de África.

Se observa el contraste entre el verdor proporcionado por los cultivos y la aridez del inmenso desierto que bordea las zonas cultivadas. Como ya es conocido, las cíclicas crecidas del Nilo depositaban abundantes y fértiles limos en la parte baja de la cuenca. Antes de la construcción de la presa de Asuán y de la existencia del lago Nasser, se estima que el delta crecía a un ritmo medio de 1 km² al año, gracias al aporte de limos. El delta se forma en la parte baja del Nilo. La palabra delta proviene del griego, por la semejanza de su forma triangular con la letra griega delta (Δ). Está enmarcado por tres grandes ciudades: Alejandría, en la costa occidental, Port Said, en la costa oriental y, en el vértice meridional del delta, se ubica El Cairo, la ciudad más poblada de África. En su área metropolitana se ubican más de 24 millones de habitantes. Desde este punto, el Nilo se bifurca en dos grandes brazos: Rosetta, al oeste, y Damietta, al este. Al este de la imagen se aprecia el Mar Rojo y el canal de Suez, que comunica con el Mediterráneo.

Fuente: NASA/GSFC/JPL, MISR Team.

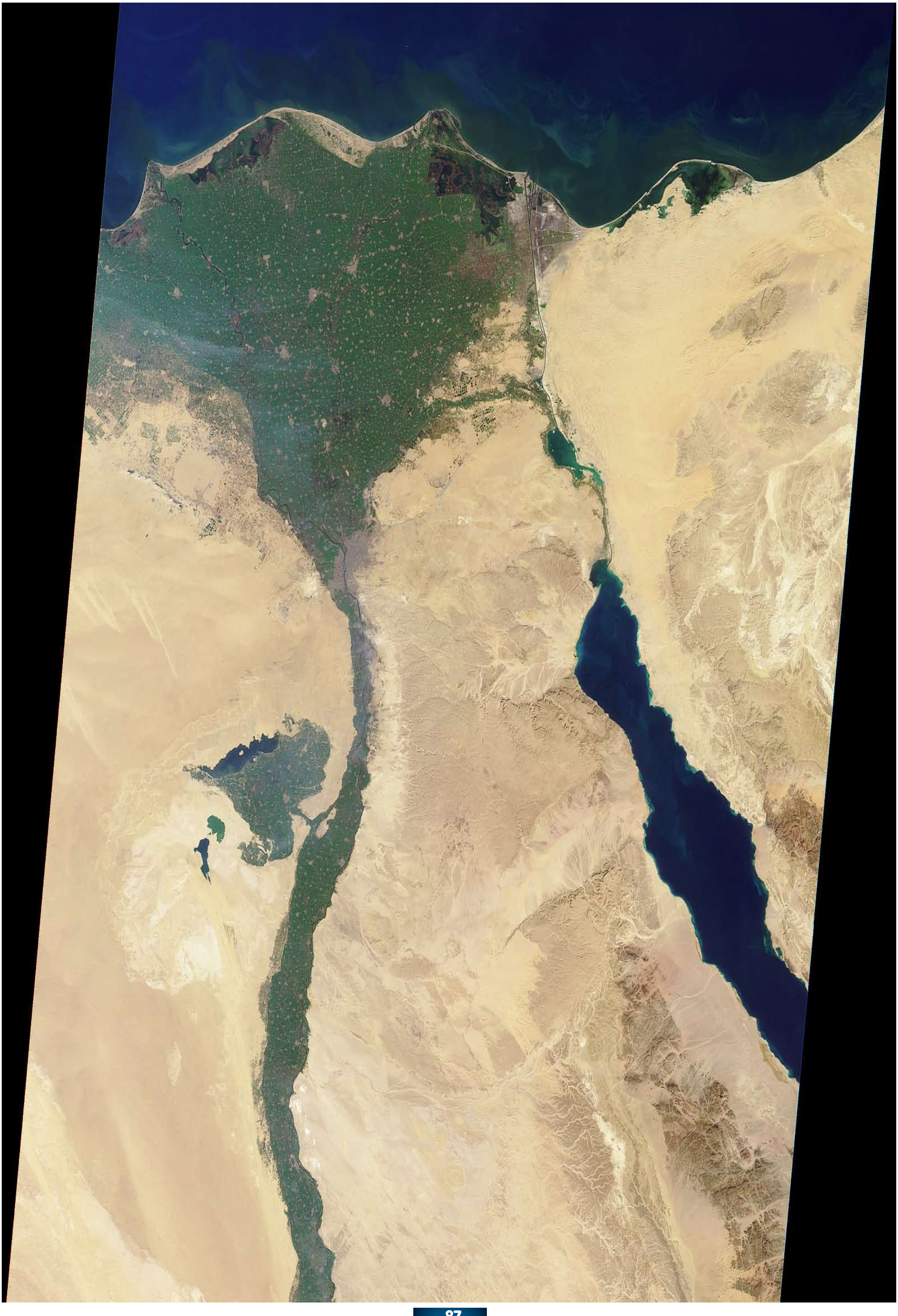


Figura 139: Imagen MERIS tomada, el día 6 de febrero de 2007, desde el satélite Envisat sobre el delta del río Mississippi.

En el sureste de la imagen se aprecia, con nitidez, el delta que forma este gran río americano. El Mississippi tiene una longitud de 3.770 km, un caudal medio en la desembocadura de 18.000 m³/s y drena una cuenca de 3.238.000 km² , que afecta a 31 estados norteamericanos.

La carga de sedimentos que aporta al Golfo de México puede observarse en colores amarillos. Sin embargo, durante las últimas décadas, los expertos han constatado una disminución drástica de la carga de sedimentos como consecuencia de causas naturales y antrópicas. Las grandes presas y embalses retienen los sedimentos, aguas arriba, por lo que los humedales de las zonas bajas se ven afectados por estas capturas de sedimentos. Se estima que estas zonas húmedas, como el gran lago Pontchartrain, al norte de Nueva Orleans, unos 160 km aguas arriba de la desembocadura del Mississippi, serán más vulnerables ante el paso de huracanes y de las grandes tormentas.

Fuente: ESA



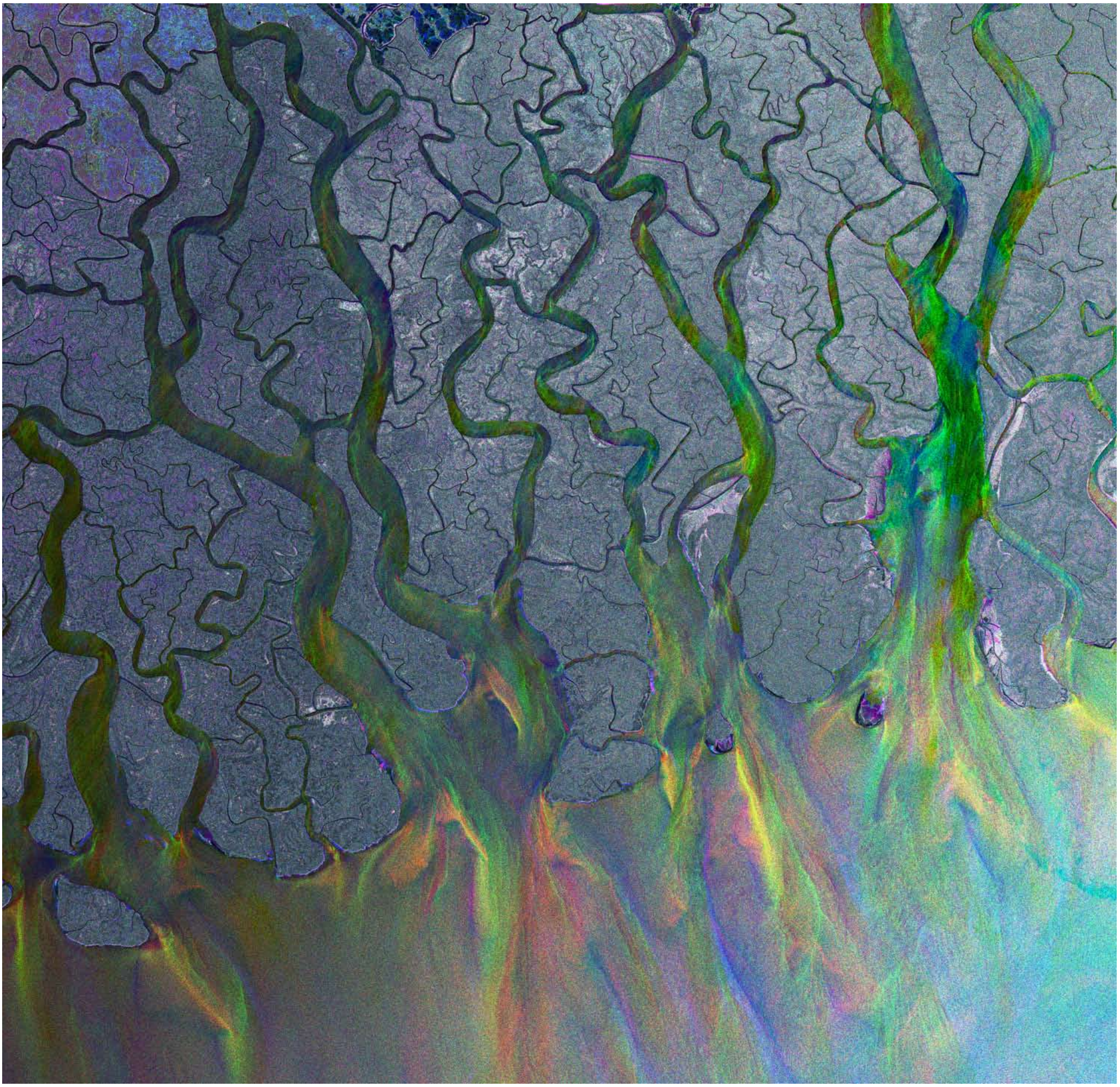




Figura 140: Imagen radar, adquirida desde el satélite Envisat, sobre el delta del Ganges, Bangladesh. Con objeto de proporcionar color, se ha realizado una fusión de tres imágenes ASAR, registradas los días 20 de enero, 24 de febrero y 31 de marzo de 2009 sobre la misma zona. Los colores son el resultado de las variaciones ocurridas en la superficie entre las tres fechas de adquisición.

En la imagen se observa el sector bangladesí del delta del Ganges, el delta más grande del mundo. Ocupa una superficie de 105.000 km². La llanura del delta tiene una anchura de 350 km a lo largo de la bahía de Bengala. El delta es formado por la confluencia del Ganges y de los ríos Brahmaputra y Meghma, configurando un gran sistema fluvial. Es una zona fértil en la que se concentran 143 millones de habitantes. La ciudad de Calcuta, fuera de la imagen, al noroeste, se ubica en el delta. La población de su área metropolitana supera los 13 millones de personas. Así pues, ésta puede ser considerada una zona muy vulnerable, especialmente al paso de ciclones y huracanes.

Por otra parte, es un área húmeda de gran interés natural. Los hábitats localizados entre las distintas bocas del Ganges están ocupados por manglares, que sirven de refugio a especies como el tigre de Bengala. En las aguas se refugian dos especies raras de delfines. La Reserva de Sunderbans ha sido declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

Fuente: ESA

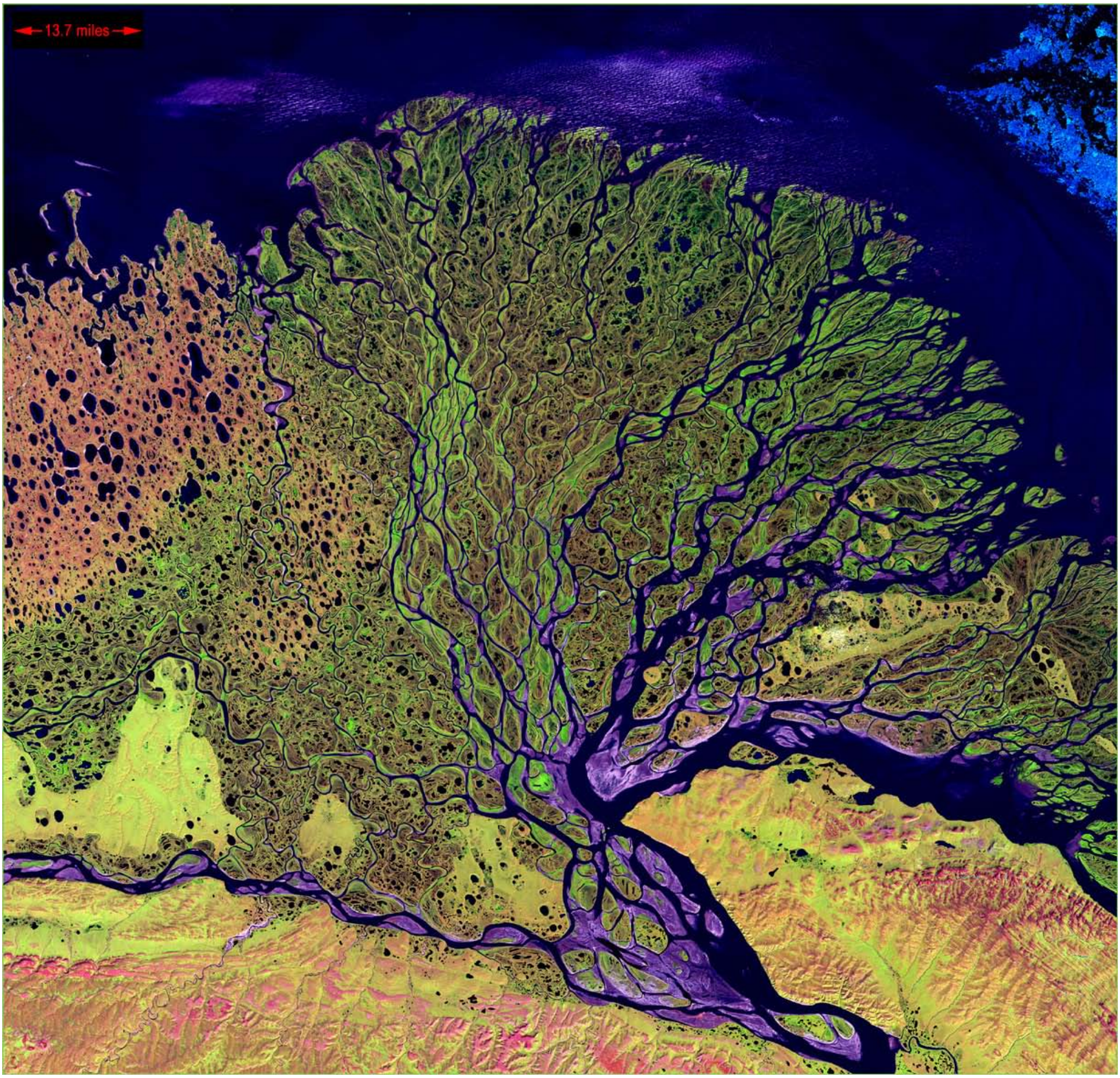


Figura 141: Imagen ETM, en falso color, adquirida por Landsat-7 el día 27 de julio de 2000 sobre el delta del río Lena, Rusia.

El Lena, con 4.313 km de longitud, ocupa el 10º puesto entre los ríos más largos del mundo. A lo largo de su amplia cuenca recoge las aguas de más de 2.000 afluentes por lo que, a pesar de recorrer buena parte de la meseta de Siberia y de atravesar zonas de escasa pluviometría, consigue registrar un caudal medio de 16.400 m^3/s en su desembocadura.

El color de la imagen es el resultado de la combinación de las bandas del infrarrojo medio, infrarrojo cercano y rojo. En la imagen se muestra, principalmente, la desembocadura del Lena en el mar de Láptev. El delta es recorrido por numerosos brazos del río. Cubre una extensión de 10.800 km^2. El delta ha sido declarado Reserva y es el área natural protegida más extensa de Rusia. Se ha consolidado como uno de los principales refugios de la fauna y flora de Siberia.

Fuente: USGS EROS Data Center. Satellite Systems Branch.



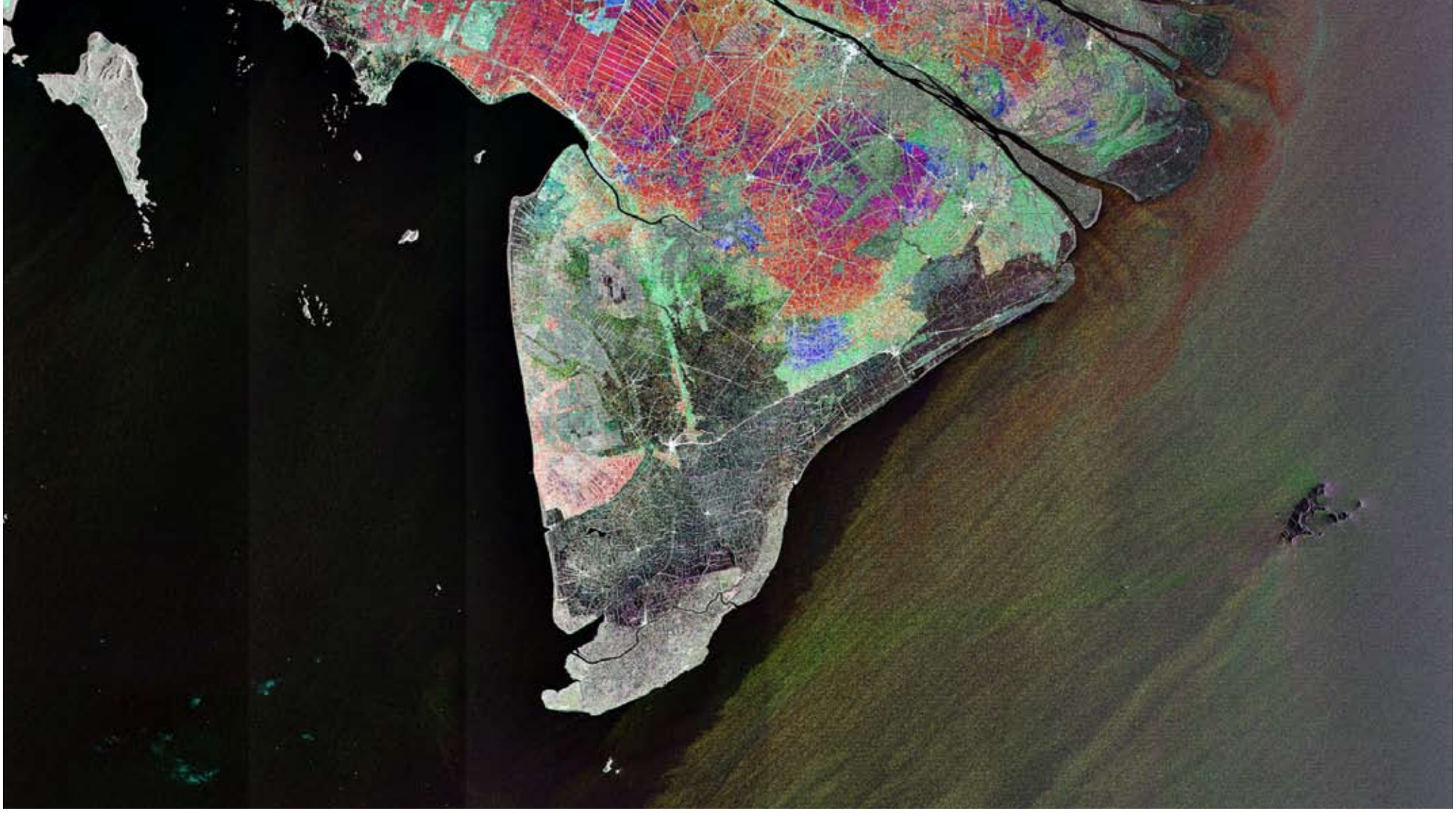




Figura 142: Imagen radar, adquirida desde el satélite Envisat, sobre el delta del Mekong, Vietnam. Con objeto de proporcionar color, se ha realizado una fusión de tres imágenes ASAR, registradas los días 9 de enero, 13 de febrero y 20 de noviembre de 2007 sobre la misma zona. Los colores son el resultado de las variaciones ocurridas en la superficie entre las tres fechas de adquisición.

En la imagen se observan las bocas del Mekong que aportan sus aguas al Mar de China Meridional. Este río, el 8º más largo del mundo, nace en el Himalaya a más de 5.000 m. de altitud. Drena una cuenca de 810.000 km² que afecta a seis países del sureste asiático. En su desembocadura, el río se divide en nueve brazos, formando un gran delta de 40.000 km², surcado por más de 3.000 km. de canales.

En la esquina noreste de la imagen se puede apreciar la gran mancha blanca que forma la ciudad de Ho Chi Minh, la antigua Saigón, al oeste del río homónimo. Es la ciudad más poblada de Vietnam y el principal puerto del país. Su área metropolitana concentra más de 9 millones de habitantes, lo que la convierte en una de las principales aglomeraciones urbanas del sureste asiático.

Fuente: ESA

Figura 143: Imagen Landsat ETM+, registrada el 26 de mayo de 2000, sobre el delta del Paraná, Argentina. Esta zona se encuentra en las inmediaciones de Buenos Aires, a unos 30 km. al norte de la capital federal. Cubre una extensión de 17.500 km². Es un delta original porque no desemboca en el mar sino en el río de La Plata.

Se trata de un gran humedal forestado que contiene una gran variedad de ecosistemas. En la imagen se aprecian las diferencias de color entre las zonas densamente forestadas (en colores rojos oscuros y pardos), los herbazales que quedan entre la densa red de canales (en verdes claros) y las zonas inundadas compuestas por las corrientes de agua y por los humedales. Es llamativo el color azul intenso del río Uruguay, al este, y de los canales del delta del Paraná.

Esta composición se ha realizado en falso color, mezclando las bandas espectrales de los infrarrojos medio y próximo y la del verde.

El extremo suroriental del delta ha sido declarado, por la UNESCO, Reserva de la Biosfera, a través del Programa MAB (Man and Biosphere). Ocupa una superficie de 88.624 ha. Alberga una rica diversidad de especies de fauna y de flora. En esta zona se puede observar el 30% de la avifauna de Argentina, cerca del 60% de sus peces de agua dulce y cerca del 20% de los anfibios.

En la actualidad, es una zona de atractivo turístico. Desde Buenos Aires se organizan visitas guiadas en barco, durante todo el año. El delta es un gran observatorio de aves.

Fuente: USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch



Figura 144: Imagen ASTER, adquirida el día 16 de julio de 2000, sobre la confluencia de los ríos Negro y Amazonas, Brasil.

En esta composición en pseudocolor natural, se observa claramente la diferencia en la calidad de las aguas de los ríos. El Amazonas, que entra en la imagen por la esquina suroeste, lleva una gran carga de sedimentos en suspensión, recogiendo las aguas de escorrentía de su cuenca alta, que drena parte de los territorios de Ecuador, Perú, Bolivia y vastas extensiones del occidente de Brasil. La lámina de agua tiene un color marrón claro. Por el contrario, el río Negro, que proviene del noroeste de Brasil y de Colombia, apenas lleva carga de sedimentos. Además, sus aguas aparecen en color negro como consecuencia de su mayor contenido en taninos.

Como puede apreciarse, las aguas aportadas por ambos ríos, discurren en paralelo, sin mezclarse, al menos durante 100 km. En la margen izquierda del río Negro, poco antes de la confluencia, se localiza la ciudad de Manaos, capital del estado de Amazonas. En la imagen, se aprecia en color blanco. La zona urbana concentra una población de 1,7 millones de habitantes. Dado que el Amazonas es navegable, el puerto de la ciudad es considerado estratégico para el desarrollo de la misma y del estado.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team



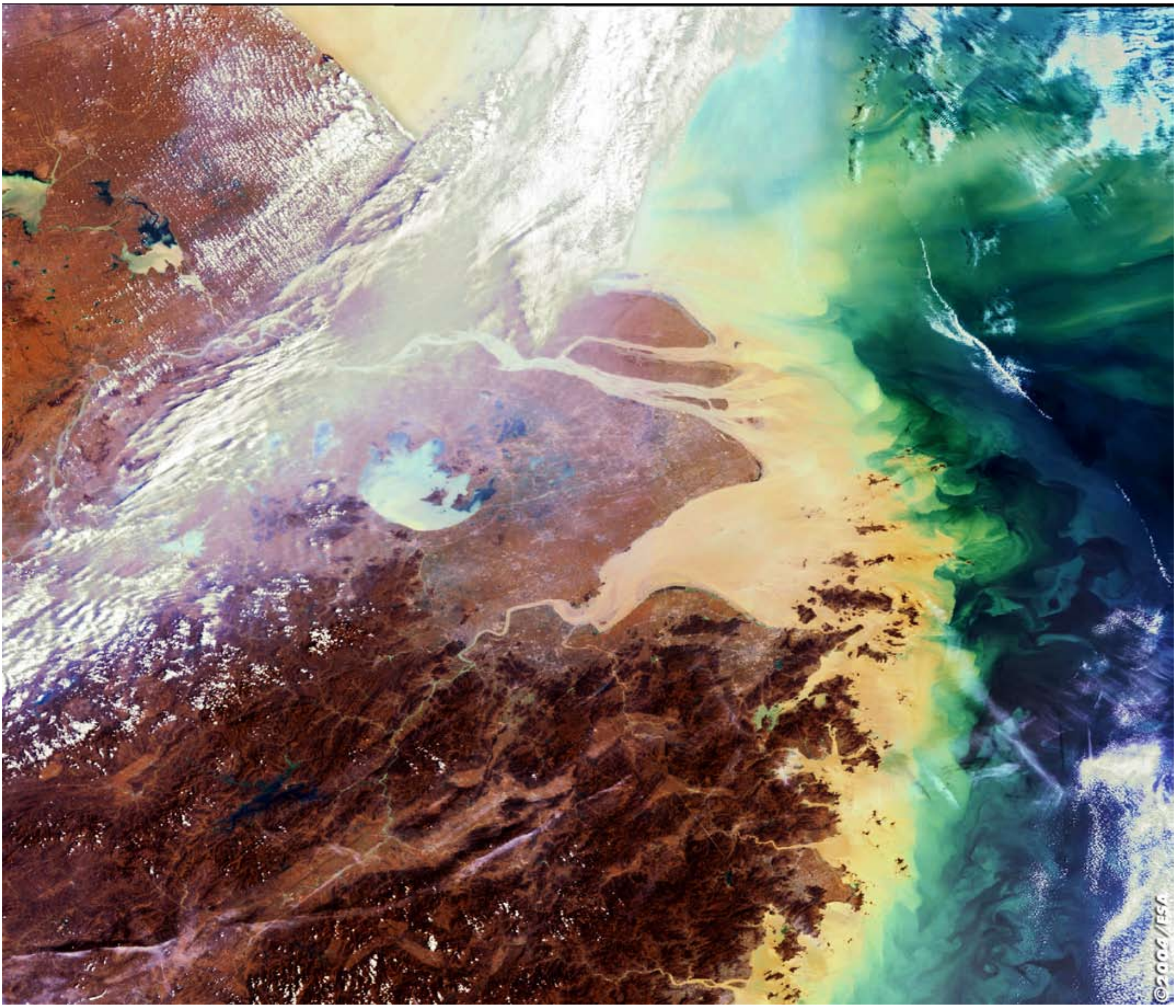


Figura 145: Imagen MERIS adquirida desde el satélite Envisat el día 21 de marzo de 2003 sobre el delta del Yangtsé, China.

El Yangtsé es el río más largo de Asia y el 3º del mundo tras el Amazonas y el Nilo. De sus 6.300 km. de longitud, cerca de 950 km. son navegables por lo que es una gran vía de comunicación y de transporte fluvial. Registra un caudal medio de 21.900 m³/s en su desembocadura, que es vertido al Mar de China Oriental. El río transporta una gran carga de sedimentos que son vertidos al mar. Se observan, en la imagen, gamas de amarillos, turquesas y azules que denotan, además de diferentes profundidades, distintas calidades de las aguas y niveles de turbidez.

Las tierras bajas están ocupadas por cultivos de arroz y de seda. Al sur del Yangtsé se observa el lago Tai Hu, de forma casi circular, que bordea por el oeste a la metrópoli de Shanghai. Ésta es la ciudad más poblada de China y una de las más habitadas del mundo. Asentada sobre la llanura aluvial del Yangtsé, su población sobrepasa los 20 millones de habitantes.

Al sur de la desembocadura del Yangtsé, un gran número de islas salpica la entrada de la bahía de Hangzhou. En el continente, al sur de la bahía, la llanura aluvial deja paso a altas tierras montañosas donde predomina el cultivo del té.

Fuente: ESA



Figura 146 (arriba): Imagen SPOT adquirida el 9 de junio de 1992 sobre el delta del río Colorado, México.
Figura 147 (abajo): Imagen SPOT adquirida el 20 de junio de 2009 sobre el delta del río Colorado, México.

Se trata de la primera imagen captada por SPOT-2 sobre el delta del río Colorado y de la última adquirida por este sistema de observación de la Tierra antes del término de su explotación comercial. Tras un largo recorrido de 2.330 km. y de tallar profundos cañones y perfilar un sistema de terrazas fluviales, el río Colorado desemboca en el Golfo de California. A pesar del tratado firmado entre México y Estados Unidos para asegurar el 9% del caudal medio en la desembocadura, en ocasiones las reservas de agua no alcanzan esta magnitud como consecuencia de los intensos aprovechamientos para el riego, la generación de energía hidroeléctrica y la evaporación de la lámina superficial. En 1992 (arriba), al menos 3 brazos del río llegaban al estuario (en verde). Diecisiete años más tarde (abajo) tan sólo llega un brazo del río.
Fuente: Spot Image, CNES.

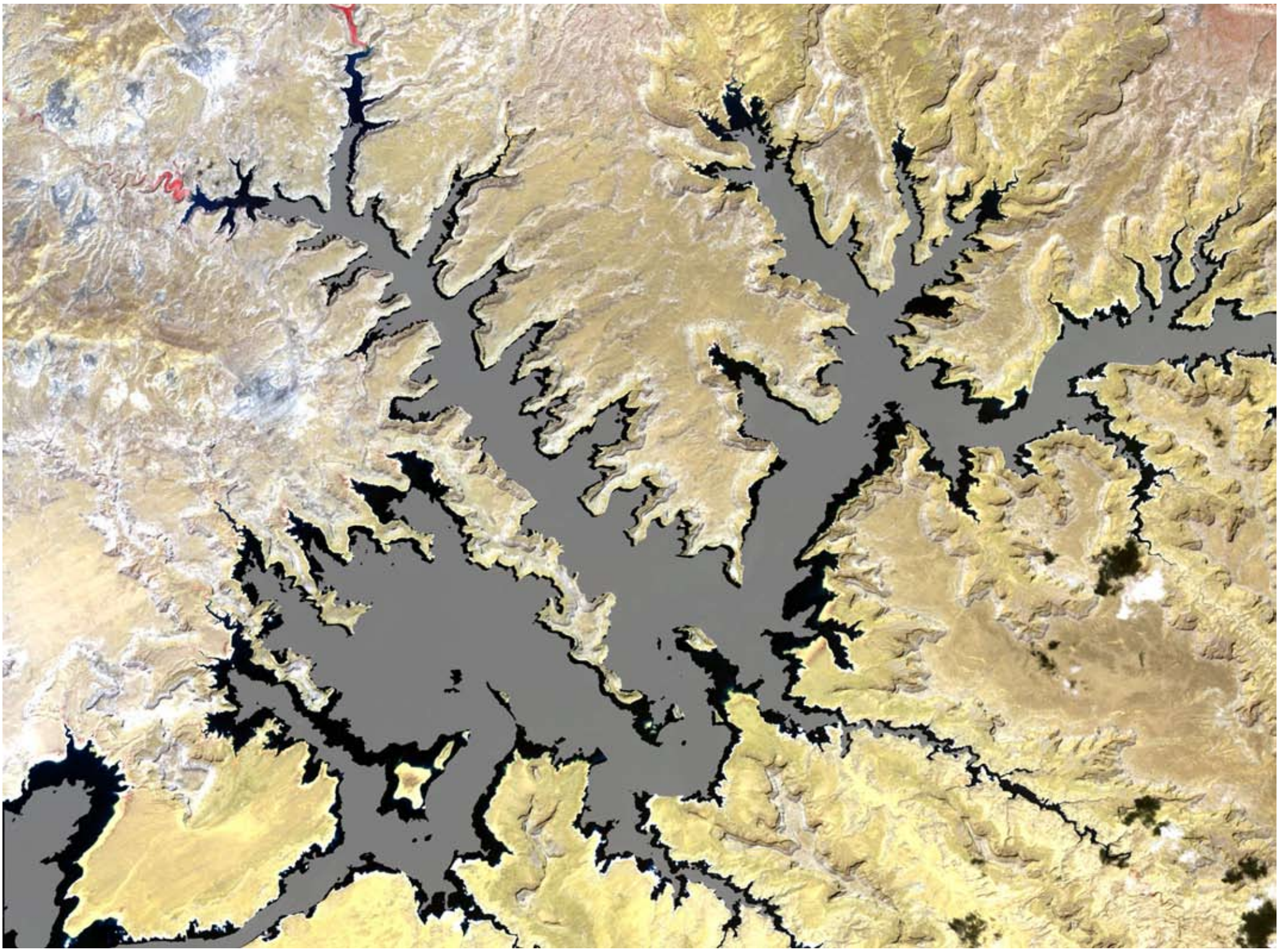




Figura 148: Imagen ASTER, tomada en 2001, sobre el lago Powell, en el río Colorado. Se encuentra en la frontera entre los estados de Utah y Arizona, aguas arriba del Gran Cañón. Sobre la meseta del Colorado, el río ha labrado otro cañón conocido con el nombre de Glen, que ha sido declarado Parque Nacional. El embalse se terminó de construir en 1963. Tiene una longitud de 300 km y la presa tiene una altura de 216 m. Ahora es un área recreativa muy frecuentada. Se encuentra entre los 26 mayores embalses del mundo, con una capacidad de agua embalsada superior a 35 Km^3.

Comparando esta imagen con otra posterior, adquirida en 2007, se ha registrado un descenso del nivel de agua del reservorio de 33 m. Esta situación ha sido calificada de crítica por las autoridades ya que millones de personas de cinco estados se abastecen de agua de éste y de otros lagos de la misma cuenca.

En la última década, esta zona del país ha sufrido una severa sequía. Algunos científicos han estimado que, en el estado de California, se ha reducido el 30% de las reservas de nieve.

Comparando las imágenes de 2007 y 2001 se puede visualizar el impacto de la sequía en la lámina de agua del lago Powell. La mancha gris es la lámina de agua existente en 2007. La orla negra del embalse indica la diferencia del nivel de las aguas entre 2007 y 2001.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 149: Imagen TM, adquirida por Landsat el día 10 de junio de 2009 sobre el lago Eyre, Australia. Este lago forma una gran cuenca endorreica, de 1.200.000 Km², que recoge las escasas precipitaciones de una buena parte del centro de Australia, desde los Territorios del Norte hasta el estado de Australia Meridional, a través del desierto de Simpson. Buena parte del lago se encuentra seco, excepto cuando se registran intensas precipitaciones que rellenan parte de su vaso. En la imagen, parte del lóbulo suroeste se ha cubierto con una lámina poco profunda (1,40 m.) que se muestra en color verde como consecuencia de las concentraciones de algas y de sedimentos. En el resto del lago se aprecia su fondo y, en algunas zonas, depósitos salinos, de color blanco. Cuando está lleno, el lago y otros humedales son hábitats de abundantes poblaciones de aves.

Cortesía de Jesse Allen; NASA-USGS.
http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/38000/38994/lakeeyre_tm5_2009081_lrg.jpg





Figura 150 (izquierda, en página anterior): Fotografía, en color natural, captada desde la Estación Espacial Internacional el día 15 de agosto de 2009, sobre el Lago de Tiberíades, también conocido como Mar de Galilea, Israel.

Ocupa una superficie de 166 km² y tiene una profundidad de 43 m. Se encuentra a 212 m. por debajo del nivel del mar, por lo que puede decirse que es el lago de agua dulce más bajo del planeta.

Se trata de un lago de origen tectónico, situado en el Gran Rift africano. La falla que separa las placas asiática y africana es recorrida por el río Jordán que sigue una dirección meridiana. Aporta sus aguas por la costa norte del mar y desagua éste por el sur. El lago es aprovechado, entre otros usos, para el regadío de explotaciones agrícolas en un medio árido. Sus aguas han permitido regar cultivos en el desierto del Néguev, en el sur de Israel.

Fuente: Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center.





Figura 151 (arriba): Imagen MODIS en color natural, adquirida el 4 de noviembre de 2001 por el satélite Terra, sobre el lago Titicaca.

La lámina de agua, en color negro, ocupa una superficie de 8.562 km². Tiene una profundidad de 365 m. Territorialmente, el 55% de sus aguas pertenecen a Perú mientras que el 45% oriental del mismo se encuentra bajo las fronteras de Bolivia. Es el segundo lago más grande de Sudamérica. El río Desaguadero drena una cuenca de 56.270 km² y desagua el lago Titicaca, transportando el agua hasta el lago Poopó y, ocasionalmente, hasta los salares de Coipasa y de Uyuni.

Es un lago de origen tectónico, situado en el altiplano peruano-boliviano que está entre las cordilleras occidental y oriental de Los Andes. Esta última se encuentra al este de la imagen y, en el momento del paso del satélite, está cubierta por nieve, en color blanco. Localizado a 3.800 m. de altura, es el lago navegable más alto del mundo. A pesar de ser un lago endorreico, sus aguas son mayoritariamente dulces aunque tienen algo de salinidad. Debido a la altitud, a la pureza del aire y a la ausencia de fuentes contaminantes en la cuenca, las aguas del lago tienen una elevada calidad.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?11012

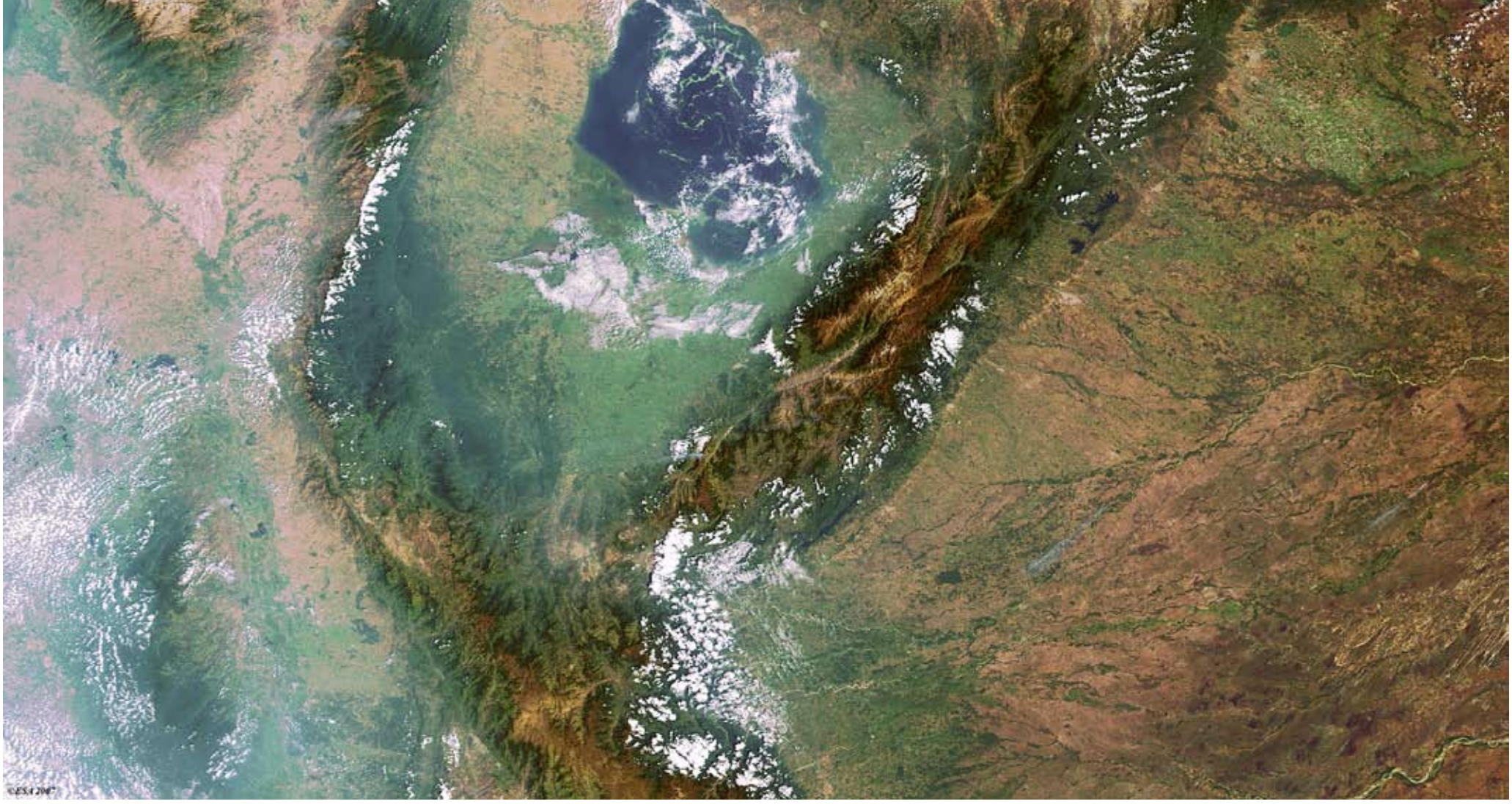




Figura 152: Imagen MERIS, captada el día 3 de febrero de 2007 desde el satélite Envisat, sobre el lago Maracaibo, Venezuela.

En el centro de la imagen se observa el lago Maracaibo rodeado de las cordilleras de Mérida, al este, y de Perijá, al oeste. El lago se conecta, a través del estrecho de Maracaibo, con el Golfo de Venezuela, en el Caribe, flanqueado por las penínsulas colombiana de Guajira, al oeste, y venezolana de Paraguaná, al este. Las nubes tapan, parcialmente, la ciudad de Maracaibo, en la esquina noroeste del lago, antes de iniciarse el estrechamiento que conecta el lago con el mar. El lago Maracaibo ocupa una superficie de 13.820 km^2, siendo considerado el más grande de Sudamérica. Tiene una profundidad de 30 m. Posee abundantes yacimientos petrolíferos que han motivado la instalación de innumerables pozos extractivos. Es una de las principales fuentes económicas de Venezuela.

Como contrapartida, el lago se encuentra intensamente contaminado por los vertidos de petróleo, principalmente, y por los vertidos de aguas residuales sin tratar, provenientes de las industrias y de las ciudades ribereñas. La acumulación de nitratos en las aguas ha ocasionado altas concentraciones de lemna, una planta acuática que impide que llegue la luz a zonas más profundas, dificultando la vida de especies tradicionales de flora y fauna

Fuente: ESA



Figura 153: Imagen MERIS, adquirida el día 3 de octubre de 2005 desde el satélite Envisat, sobre el mar Caspio.

La imagen capta el lóbulo meridional del mar. En el sentido de las agujas del reloj, esta costa baña los países de Turkmenistán, Irán y Azerbaiyán, desde la península de Krasnovodsk, en el este, hasta la ciudad de Bakú, localizada en la península de la orilla occidental. La zona sureste es un área pantanosa de humedales. La escasa profundidad y los sedimentos otorgan ese color azul turquesa a las aguas del área de Gasan-Kuli.

El mar Caspio ocupa una superficie de 371.900 km². Su superficie se encuentra por debajo del nivel del mar. Drena una vasta cuenca de 3.626.000 km². Se trata de la cuenca endorreica más grande de la Tierra. Su principal tributario es el río Volga, que aporta su caudal por la parte norte del mar, fuera de la imagen. Ningún río desagua sus recursos hídricos, de manera que las únicas pérdidas se realizan mediante evaporación, dando lugar a depósitos salinos. El Caspio marca parte de la frontera entre Europa y Asia.

Esta zona del mar es rica en yacimientos petrolíferos. En las inmediaciones de la ciudad de Bakú, se halla un extenso campo petrolífero. En la orilla opuesta, al sur de Nebit-Dag, se encuentran ricos yacimientos de gas natural. En la zona sur del mar se aprecian manchas verdes oscuras que son concentraciones de algas. La zona litoral más fértil es la iraní, en la ribera meridional, que se extiende a lo largo de una estrecha franja hasta la ciudad de Bakú. Esta zona contrasta con la inmensidad de los desiertos.

Fuente: ESA.



Figura 154 (arriba): Imagen Landsat TM, en color natural, del Lago Balatón, Hungría. El lago se localiza a unos 100 km. al suroeste de Budapest. Ocupa una superficie de 594 km² y tiene una profundidad media de 3 metros. Es una de las principales entidades hidrográficas del país, junto al Danubio. Tiene una función turístico-recreativa principal. Buena parte del turismo interior del país tiene como destino el lago.

Fuente: NASA.

Figura 155 (abajo): Imagen Landsat TM, en pseudocolor natural, adquirida en 2000, sobre el Lago Balatón y su área de influencia. El lago ejerce un papel importante como regulador del clima de la zona. Modera las temperaturas, evitando los cambios bruscos, e incrementa las precipitaciones medias normales en la zona. Al sur y este del lago se observa una densa red de lagos más pequeños ubicados sobre la gran llanura centroeuropea.

Fuente: NASA; https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/





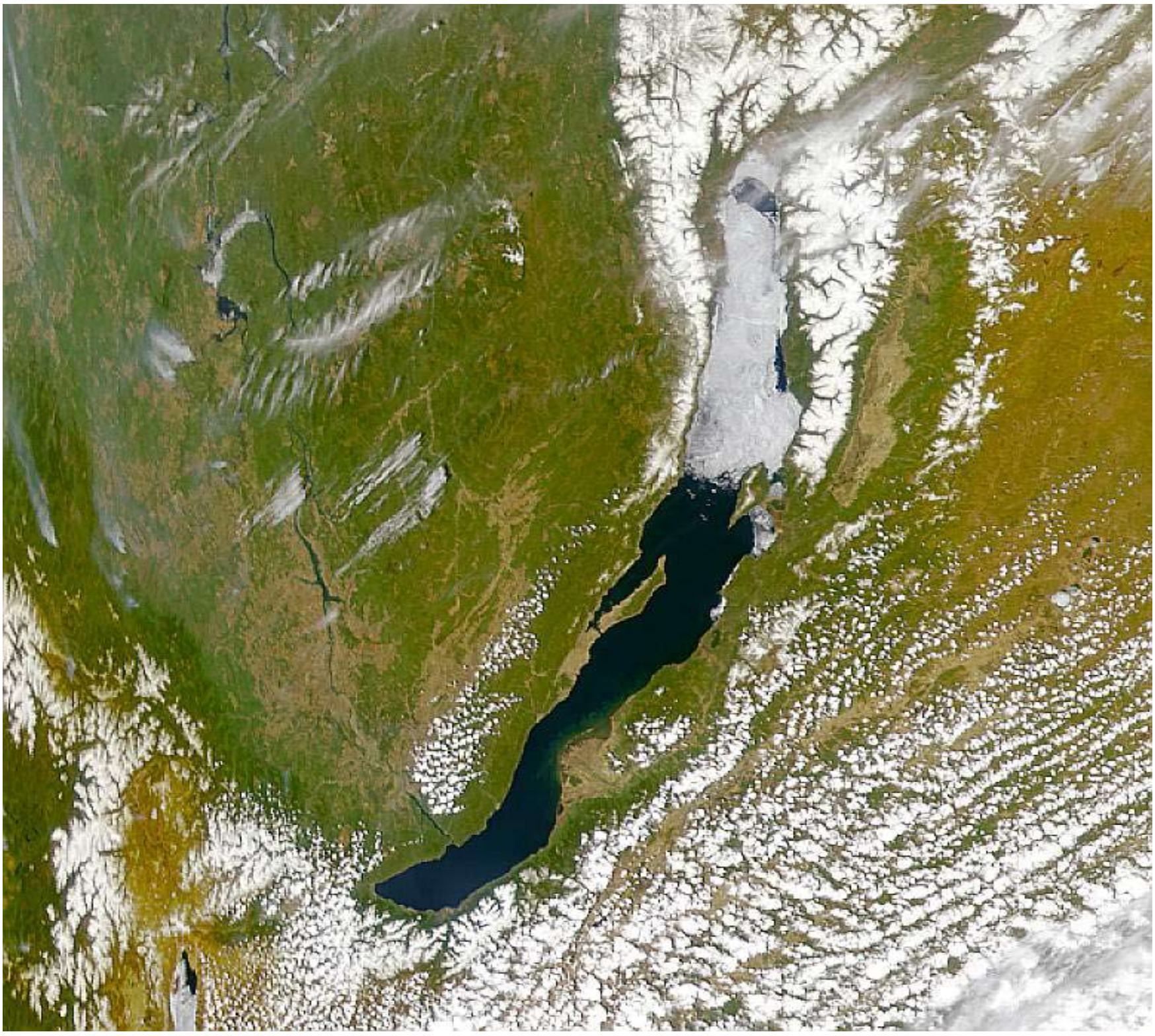




Figura 156: Imagen SeaWiFS, adquirida el 23 de mayo de 1999 desde el satélite OrbView-2, sobre el lago Baikal, Rusia.

El lago Baikal se localiza al sureste de la Federación Rusa, en la región de Siberia, cerca de la frontera con Mongolia, a 467 m. sobre el nivel del mar. Ocupa una honda fosa continental, dispuesta en dirección suroeste-noreste, en el interior de una vasta zona montañosa y de altiplanos que se prolonga, a través de Mongolia y de Siberia hasta el Pacífico. La falla principal está activa desde el punto de vista sísmico. El lago está enmarcado por dos cadenas montañosas: los montes homónimos del lago, al oeste, y los Montes Barguzinskii, al este. Los Montes Baikal sustentan un ecosistema de taigá. Su interés natural ha motivado la declaración de los mismos como parque nacional.

Tiene una superficie de 31.494 km² y una gran profundidad de 1.637 m. Es el lago de agua dulce más grande de Asia y el más profundo del mundo. El volumen de agua que contiene equivale al 20% del agua dulce de toda la Tierra. Es el lago que más volumen de agua alberga en el mundo. La calidad de las aguas es muy buena, a pesar de estar amenazado, de forma creciente, por distintas fuentes de contaminación. Sustenta una rica diversidad biológica. Fue catalogado, por la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad en 1996.

El lago recibe los aportes hídricos de distintos ríos. El principal es el río Angará, afluente del Yenisei, que entra en el lago por el noreste, procedente de la altiplanicie de Stanovoi, fuera de la imagen. El tercio norte del lago se encuentra cubierto de hielo buena parte del año, como en la imagen. Este mismo río desagua el lago por su parte suroccidental. Aguas abajo, las aguas transportadas por el río son reguladas por el gran embalse de Bratsk, estrecho y alargado. Se observa, en la imagen, su lámina de agua, de color negro, entre las nubes. El río Selenge, proveniente de Mongolia, entra en el lago por el sureste. Éste es el principal responsable de los aportes de contaminantes.

Fuente: www.visibleearth.nasa.gov

5.2.4. GLACIARES

Un glaciar puede definirse como *una gran acumulación natural de hielo situada en tierra firme y afectada por un movimiento pasado o presente* (Strahler y Strahler, 1989, p. 357). Es necesario que la nieve precipitada en invierno sea mayor que la ablación producida en verano, es decir que exceda a las pérdidas provocadas por la evaporación y por la fusión del hielo y de la nieve. De esta manera, cada año se va superponiendo una masa de nieve a la acumulada anteriormente. A medida que la nieve se compacta, se transforma en hielo granular y éste se convierte en hielo cristalino cuando es comprimido por las capas superiores. Cuando la masa de hielo alcanza grandes espesores (más de 50 m. según algunos autores), las capas inferiores adquieren plasticidad y el conjunto de nieve y hielo acumulado comienza a desplazarse a favor de la pendiente. En ese momento, se puede hablar de un glaciar activo. Se estima que los glaciares almacenan en torno al 75% del agua dulce del planeta.

Actualmente, los glaciares se distribuyen geográficamente en las zonas de alta montaña, por encima del nivel de nieves perpetuas, y en áreas de altas latitudes, en las cuales el balance entre ganancias (caída de nieve) y pérdidas (evaporación y fusión) sea favorable y en las que la temperatura permita la existencia de hielo durante todo el año. Altitudinalmente, el límite de nieve perpetua es variable dependiendo de la latitud. Por ejemplo, en latitudes ecuatoriales asciende a 5.000 m. de altitud mientras que en latitudes medias se encuentra en torno a 2.700m. y en zonas subpolares y polares puede oscilar entre 600 m. y el nivel del mar. A pesar de ello, hay indicios de que los glaciares pudieron ocupar otros territorios de latitudes y altitudes más bajas en épocas pasadas. Estas diferencias entre el pasado y el presente aún suscitan discusión científica. Algunos autores lo atribuyen a la deriva continental mientras que otros no creen que esta causa sea suficientemente justificativa y lo relacionan con variaciones en la órbita terrestre y cambios en la oblicuidad de su eje respecto al plano de su órbita.

Según sus características y su localización geográfica, los glaciares se clasifican en dos tipos: de montaña y continentales (Rebollo, 2010). Entre los glaciares de montaña se distinguen los siguientes:

1. Glaciares de circo: rellenan las zonas cóncavas en los flancos de las cimas montañosas.
2. Glaciares de meseta: recubren zonas elevadas en las cadenas montañosas.
3. Glaciares de valle: se encuentran encajados en valles de regiones montañosas y se deslizan a favor de la pendiente.
4. Glaciares de piedemonte: se extienden, al final de un valle, a lo largo de una llanura formando un lóbulo.

Los glaciares continentales son vastas superficies de hielo de miles de kilómetros de extensión que se extienden sobre la corteza continental. Se desplazan radialmente. En ocasiones, los glaciares sobrepasan la superficie de tierra emergida, extendiéndose lentamente desde la costa hasta flotar encima del océano. En estos casos se habla de plataformas de hielo.

Los principales riesgos asociados a los procesos glaciares son las avalanchas de bloques de hielo y de mantos de nieve, inundaciones producidas por fusiones rápidas, a veces asociadas a erupciones volcánicas, rotura de presas naturales y avance de los glaciares sobre zonas ocupadas por el hombre. Estos riesgos deben sumarse a los que ocurren debido a los procesos periglaciares. Entre ellos, pueden citarse a las fracturas de rocas y a los deslizamientos como consecuencia de los frecuentes cambios de estado y volumen del agua (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

La principal amenaza que se cierne sobre los glaciares es el calentamiento global provocado por el incremento y acumulación de CO_2 y de otros gases y aerosoles de efecto invernadero. Aunque no existe unanimidad y está abierto un debate científico sobre la velocidad, magnitud y gravedad del proceso, según los datos analizados desde que existen registros fiables, parece cierto que la temperatura se está incrementando 0,5ºC cada década. Este calentamiento está produciendo pérdidas significativas y la reducción de las masas de hielo de los glaciares así como fracturas y desprendimientos de grandes bloques de hielo.



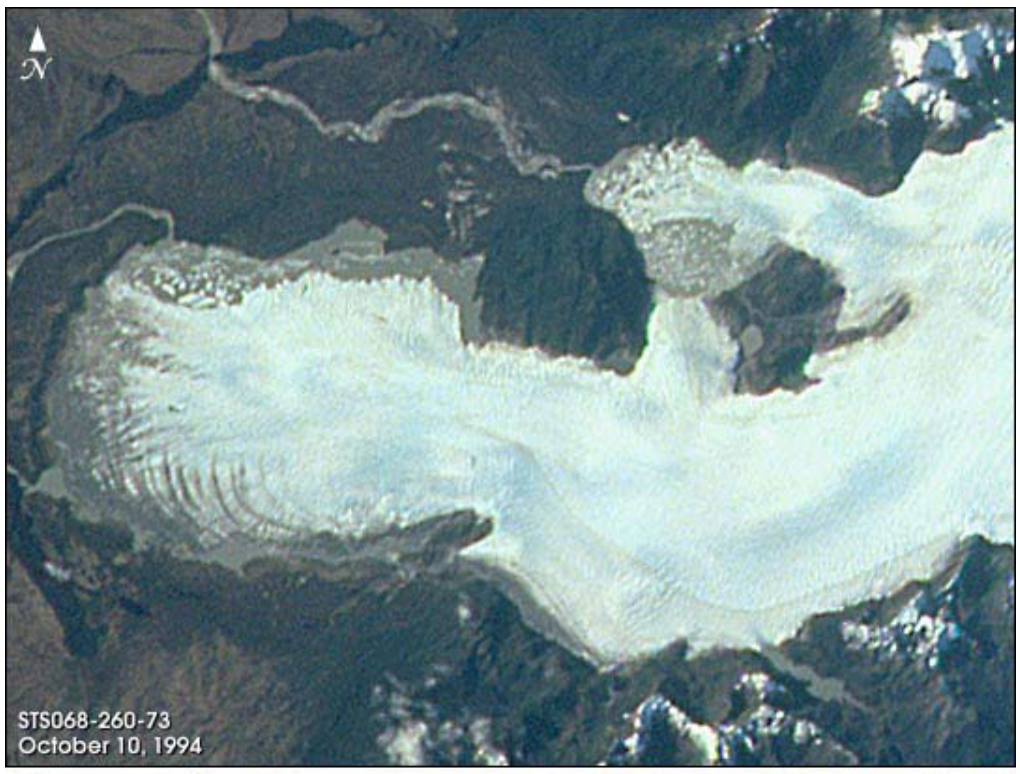




Figura 157: Conjunto de fotografías adquiridas, desde el Space Shuttle, el 10 de octubre de 1994 (arriba) y, desde la Estación Espacial Internacional, el 7 de marzo de 2002. En ellas se observa, de forma dinámica, el glaciar de San Quintín, en el sur de Chile.

A pesar de que han sido captadas en épocas y condiciones de iluminación distintas, es evidente la pérdida de masa, especialmente en el lóbulo del centro y en el perímetro de la morrena terminal del oeste. Los glaciares son uno de los objetivos científicos prioritarios de las tripulaciones de las misiones espaciales.

Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

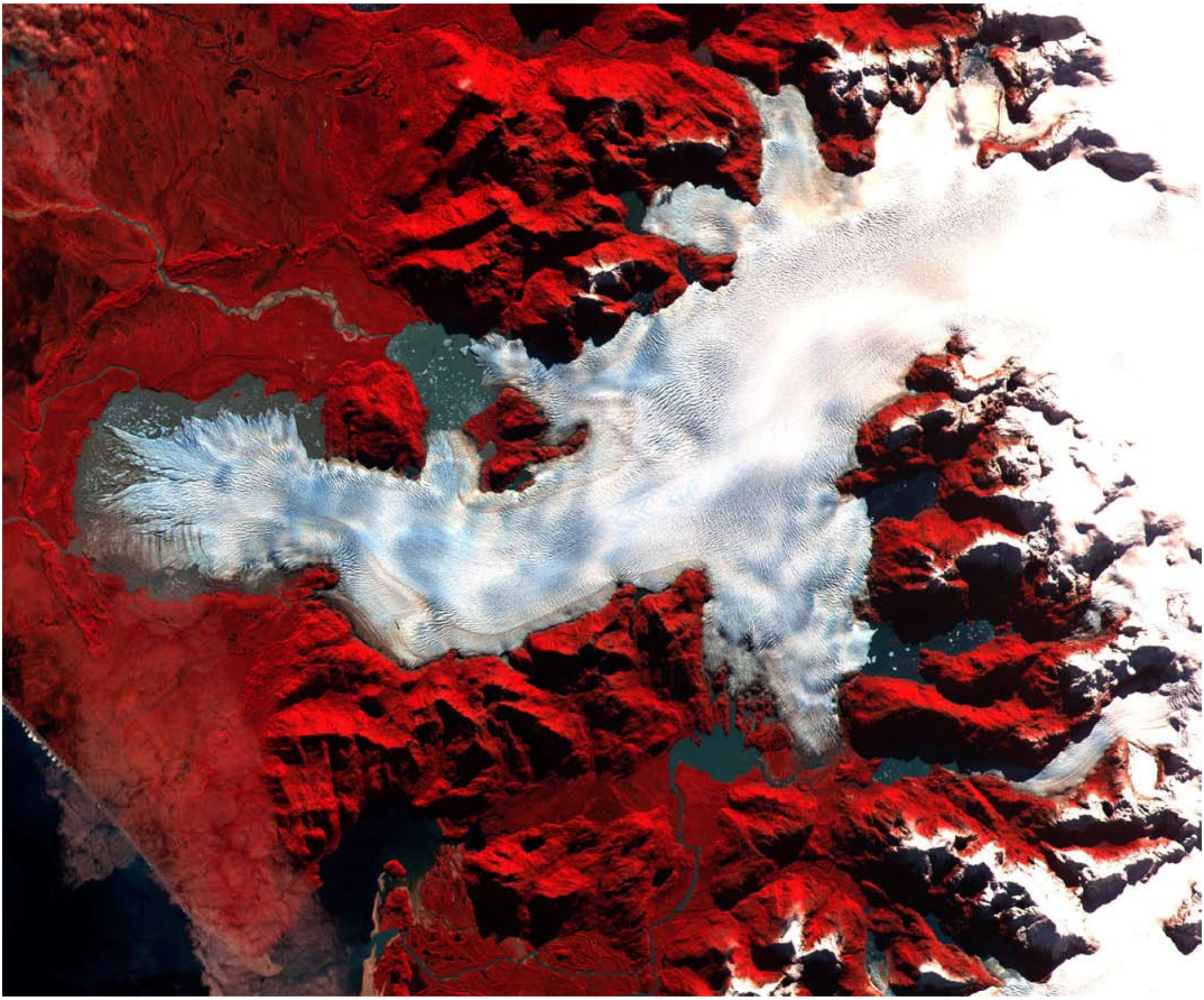


Figura 158: Imagen ASTER registrada, por el satéliteTerra, el 2 de mayo de 2000 sobre el glaciar de San Quintín, localizado en la XI Región de Chile.

La vegetación que rodea al glaciar se observa en rojo debido a que la imagen está compuesta en falso color. A las bandas espectrales del infrarrojo cercano, del rojo y del verde se les han asignado los colores primarios, rojo, verde y azul, respectivamente.

Como se ha comentado en la imagen anterior, el glaciar de San Quintín está en retroceso. En la morrena terminal de la izquierda de la imagen se aprecian rocas y suelo al desnudo en el extremo occidental que antes estaba cubierto por la masa de hielo. Ésta se encuentra llena de profundas grietas. Los charcos están ocupados por agua y una carga de sedimentos que se encuentran en suspensión en las láminas de agua. En el este de la imagen se observan varios valles paralelos en los que el glaciar ha retrocedido. Se han realizado distintas mediciones sobre el glaciar. Desde 1993, se está constatando que ha perdido una importante masa de hielo, lo que ha originado el colapso parcial de su frente.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?7149



Figura 159: Imagen Landsat, adquirida el 14 de octubre de 2001, sobre el sector meridional del Parque Nacional de los Glaciares, Argentina.

El parque se localiza en el suroeste de Argentina, en la frontera con Chile, en el contacto entre la Patagonia y los Andes. Es una región de altas montañas, acompañada de masas forestales, glaciares y roquedos de granito labrados por aquéllos. El parque nacional ha sido declarado, por la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad en 1981. En la imagen se aprecian la extensa masa de hielo de los glaciares en color blanco, las masas de agua de los lagos, en color azul (Viedma, al norte, y Argentino, en el centro) y las zonas de roquedo o cubiertas por un tapiz vegetal poco denso, en color marrón.

En el sureste de la imagen se puede observar el glaciar Perito Moreno. Cuando la masa de hielo avanza, el frente del glaciar tapona el Brazo Rico, el ramal más meridional, en forma de T, del Lago Argentino. Cuando el nivel del agua se incrementa en el Brazo Rico, la presión ejercida por el agua rompe la esquina oriental del frente del glaciar (en el extremo superior izquierdo de la T). Este fenómeno ocurre cada 4 o 5 años, aunque este acontecimiento no sigue un patrón regular.

Cortesía de: Jesse Allen, Earth Observatory
NASA-University of Maryland's Global Land Cover Facility.









Figura 160 (arriba): Panorámica del frente del glaciar Perito Moreno y del campo de hielo rodeado por montañas.

Figura 161 (centro izquierda): Vista de la esquina oriental del frente del glaciar Perito Moreno, donde se produce periódicamente la ruptura. Detrás, se puede observar el Brazo Rico.

Figura 162 (centro derecha): Vista del frente del glaciar Perito Moreno hacia el oeste.

Figura 163: Iceberg flotando sobre el Lago Argentino, en el Parque Nacional de los Glaciares.

Fuente: Susana de Pablos



Figura 164: Imagen ETM en color natural, adquirida por Landsat 7, el 14 de septiembre de 2001 sobre el Parque Nacional de los Glaciares, en Canadá.

Esta área protegida se localiza al noroeste de Calgary, cerca del límite entre las provincias canadienses de Alberta y de British Columbia, en la cadena montañosa de Columbia. Es una zona donde se registran abundantes precipitaciones por las masas de aire húmedas que proceden del Pacífico. Además, en invierno las temperaturas son templadas o moderadas, sin alcanzar los registros extremos típicos de otras cadenas montañosas canadienses.

En el interior del parque nacional se distinguen tres ecosistemas. En las laderas más bajas del parque, se encuentra el bosque lluvioso templado, propio de esta zona pacífica del noroeste de Canadá. En estas zonas, las precipitaciones se producen, predominantemente, en forma de lluvia. En la imagen se observa este ecosistema en color verde oscuro. En las zonas altas, las precipitaciones se producen en forma de nieve. Las áreas de innivación y las masas de hielo de los glaciares se muestran en color blanco. Cubren un 12% de la superficie del parque. Por último, se encuentra la zona supraforestal, es decir aquella que se encuentra, altitudinalmente, por encima del nivel donde existen condiciones idóneas para el desarrollo de las masas arbóreas. Esta zona está ocupada por la tundra en la que se desarrollan formaciones de matorral y manchas de roquedo, en gris oscuro. Hay zonas de suelo desnudo que se muestran en color beige.

A lo largo del valle del cuadrante nororiental de la imagen se observa la autopista transcanadiense como una línea de color gris claro. Se terminó de construir en 1962 y, desde entonces, la frecuentación del parque ha aumentado al construirse centros de interpretación y áreas recreativas.

Cortesía de: Jesse Allen, Earth Observatory NASA-USGS-World Conservation Union y UNEP- University of Maryland's Global Land Cover Facility.





Figura 165: Imagen ASTER adquirida, desde el satélite Terra, el día 12 de abril de 2009 sobre la plataforma de hielo Wilkins, Antártida.

Esta plataforma se encuentra en el oeste de la península Antártica, en la zona más próxima al cono sur americano. Se desarrolla entre las islas Charcot, Latady y Alexander y la península, cubriendo el canal Wilkins, del que toma su nombre. Ocupa una superficie de 16.500 km².

En marzo de 2008 se desprendió, de la plataforma principal, una masa de hielo de 405 km². Los científicos creen que las causas son el incremento de temperatura en 0,5ºC por década, debido al calentamiento global, y la ocurrencia de varios terremotos en la dorsal Pacífico-Antártida. La plataforma está unida a la isla Charcot a través de un estrecho istmo. Entre el 30 y 31 de mayo de 2008, nuevamente se desprendió otro bloque de 160 km². Estos desprendimientos han estrechado el istmo de 6 a 2,7 km. Se estima que, en 2008, la plataforma ha perdido una superficie de hielo de 2000 km².

Debido a las múltiples grietas mostradas en la superficie y al riesgo inminente de ruptura, la plataforma Wilkins ha sido sometida, en el último año, a un seguimiento diario por parte de los satélites de las agencias espaciales europea y norteamericana, Envisat, Terra y Aqua. El 5 de abril de 2009, la ESA confirmó la ruptura definitiva de la plataforma, quedando desconectados sus 14.000 km² de tierra firme.

En la imagen se aprecian, claramente, las líneas de ruptura y grietas y el color oscuro del océano, a través de ellas. Asimismo, se observan los grandes bloques e icebergs que se han desprendido de la plataforma principal.

Cortesía de Jesse Allen.
NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.

6. IMPACTOS AMBIENTALES

Aunque la expresión impacto ambiental está discutida por los expertos y muchos de ellos no la consideran muy afortunada, el hecho es que su uso se ha extendido en el lenguaje popular e, incluso, en la literatura científica. Habitualmente, se entiende por impacto ambiental los efectos producidos por una acción humana determinada, o una combinación de ellas, sobre el medio ambiente. Aunque los efectos pueden ser positivos, por norma general, el impacto ambiental suele tener una connotación peyorativa, considerándose principalmente los efectos adversos que las actividades humanas ocasionan.

El hombre transforma continuamente el medio natural. Cuanto mayor es el grado de tecnificación de una sociedad más grande es su capacidad para modificar los ecosistemas. En ocasiones, las infraestructuras construidas suponen un impulso sobre el desarrollo socioeconómico de un territorio determinado. Es el caso de numerosas infraestructuras hidráulicas, tales como grandes embalses o canales, a través de los cuales se trasvasa agua de una cuenca hidrográfica a otra. Otras veces es la presencia de un acuífero subterráneo el que permite transformar amplias zonas áridas en productivos campos de cultivos regados mediante pivots, aspersores o empleando sistemas de riego por goteo.

Sin embargo, otras veces el hombre provoca profundas transformaciones sobre los ecosistemas tradicionales que, en ocasiones, se vuelven irreversibles o adquieren una difícil reversibilidad. Es el caso de algunos cambios en los sistemas agrícolas tradicionales, de la deforestación de los bosques que favorece el avance de la frontera agrícola, de los incendios forestales asociados a la actividad humana, de la desecación de grandes masas de agua y de humedales que soportan una rica diversidad biológica, de la eutrofización de lagos, embalses y de otras masas de agua, del avance imparable de las zonas urbanas sobre áreas de gran interés ecológico o de elevada vulnerabilidad, de los frecuentes vertidos de hidrocarburos al mar debidos a accidentes o a la negligencia de las tripulaciones que limpian los fondos de los buques, de forma ilegal, en los mares, de las actividades mineras que dejan una huella evidente sobre el paisaje, especialmente cuando se trata de una minería practicada a cielo abierto, de la construcción de grandes infraestructuras viarias o hidráulicas y del deshielo y retroceso de los glaciares y de las plataformas de hielo como consecuencia del cambio climático.

Algunos de estos impactos producidos por el hombre han sido seleccionados para ser presentados en este capítulo sexto. Gracias a su visión global, la teledetección espacial es capaz de registrar transformaciones que se producen de forma extensa y difusa en el territorio.

Asimismo, el carácter multitemporal de esta técnica, permite detectar cambios producidos a lo largo de un periodo determinado, posibilitando un seguimiento dinámico en el espacio y en el tiempo.

6.1. MODELOS DE OCUPACIÓN DEL SUELO EN EL MUNDO

Tradicionalmente, cada sociedad se ha caracterizado por una relación diferente con su medio natural. Unas han sabido administrar mejor sus recursos naturales mientras que otras, menos preocupadas por el efecto de sus actividades o, quizás, con mayor capacidad tecnológica, han transformado profundamente sus paisajes naturales, dando lugar a paisajes antropizados y, en muchos casos, degradados.

Territorial y paisajísticamente, las diferentes formas de interaccionar con el medio ambiente han dado lugar a distintos modelos de ocupación del suelo. En algunos casos, entre comunidades vecinas, las diferencias entre estos modelos son patentes, evidenciando un claro y perceptible efecto frontera. La revolución tecnológica de los últimos siglos ha supuesto un cambio de escala en la transformación de los sistemas de ocupación del suelo. Los impactos ambientales producidos han dejado de ser locales para convertirse en globales. Ahora tienen una importancia planetaria.

Numerosos son los programas y proyectos internacionales que se preocupan por este tema. IGBP (*International Geosphere and Biosphere Program*), LUCC (*Land Use & Cover Change*) y LULCC (*Land Use & Land Cover Change*) son algunos de ellos. CORINE (*CoORdination sur l'INformation Environmental*) o SIOSE (*Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España*) son referencias obligadas a nivel europeo y nacional.

Todos ellos emplean, de forma principal, imágenes de satélite para hacer un seguimiento multitemporal de la ocupación del suelo y de sus patrones correspondientes en diferentes zonas del mundo.

En consecuencia, las agencias espaciales están plenamente comprometidas en este tema. La NASA, por ejemplo, ha producido una serie temporal de mapas globales de los patrones de uso del suelo entre 1700 y 1990. Hasta fechas recientes, las zonas más pobres del mundo y las menos ocupadas apenas han experimentado cambios. Sin embargo, en la actualidad, los cambios afectan a todo el planeta.

Foley *et al*., 2005, se refieren a estos cambios como uno de los mayores problemas ambientales de la actualidad. Algunos expertos apuntan a que las transformaciones en los usos del suelo rivalizan con los gases de efecto invernadero como causa del cambio climático. Cada año millones de hectáreas de ecosistemas naturales se transforman. La alteración masiva de los paisajes naturales puede socavar la capacidad de los ecosistemas para sostener una población creciente.



Figura 166: Vista del valle del río Mayor (Cuenca, España), que vierte sus aguas al embalse de Buendía. El fondo del valle está ocupado por cultivos de secano mientras que los taludes de las alcarrias, tradicionalmente han estado ocupadas por plantas aromáticas, muchas de ellas especies endémicas.

Fuente: Javier Martínez Vega

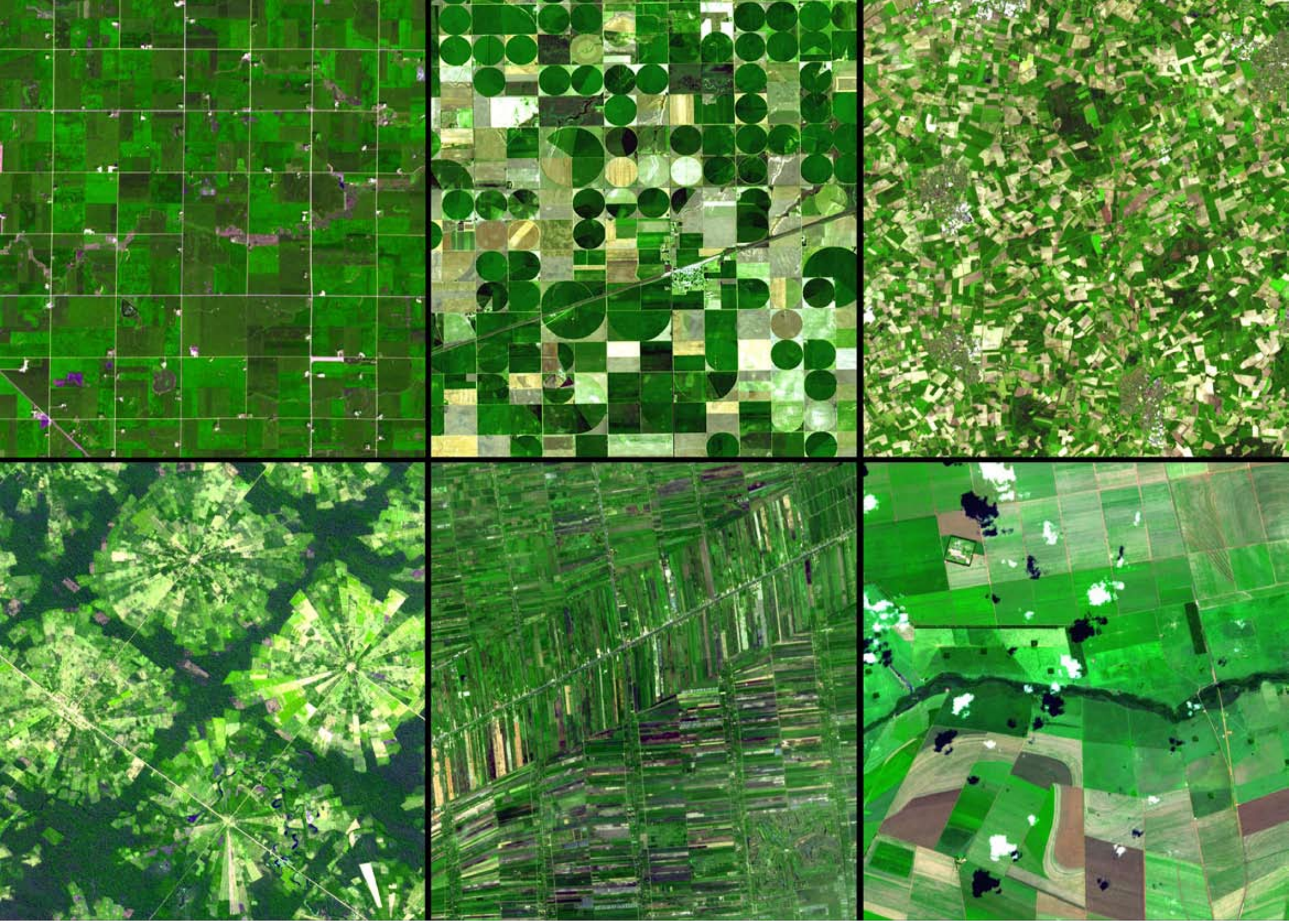


Figura 167: Mosaico de seis subescenas ASTER en color natural que muestran distintos patrones de ocupación de suelos agrícolas en el mundo. Cada subescena cubre un área de 10,5 x 12 km. de lado.

Tradicionalmente, los paisajes agrícolas eran el resultado de una combinación de factores entre los que estaban involucrados la topografía, el tipo de suelo, el tipo de cultivo, la precipitación anual de la zona y la tradición cultural. En la actualidad, sobreviven paisajes culturales milenarios junto a otros que son fruto de las transformaciones recientes en las que uno de los factores se ha impuesto sobre los demás o ha sido compensado por otros.

En la imagen superior izquierda se aprecia un paisaje agrícola de Minessota, Estados Unidos. La forma y tamaño regular de las parcelas es una herencia de comienzos del s. XIX. Se fundamenta en las técnicas de la época para la mecanización de los cultivos. En la escena central superior (Kansas, Estados Unidos) se observa el patrón geométrico de los campos regados por aspersión mediante pivots de avance circular. La longitud de los sistemas de riego determinan el radio de las parcelas circulares y, en consecuencia, su superficie. En la imagen superior derecha (noroeste de Alemania), se ilustra un ejemplo típico de Europa Occidental en el que el patrón irregular de las parcelas es una herencia de la Edad Media. Existe una gran heterogeneidad en cuanto al tamaño de las parcelas aunque predominan las pequeñas parcelas, fruto quizás de las pequeñas dimensiones de los países europeos y de la presión demográfica, si se compara con la de otros continentes de reciente poblamiento.

En la imagen inferior izquierda (Santa Cruz, Bolivia) se observa uno de los típicos patrones agrícolas, con formas radioconcéntricas, resultantes de la deforestación del bosque tropical y de un esquema concreto de colonización, apoyado en los núcleos de poblamiento que son los ejes centrales de cada sector. Los sectores agrícolas (en colores amarillos y verdes claros) contrastan claramente con las manchas forestales (verdes oscuras y texturas gruesas) que quedan entre unas comunidades y otras (cada una de las unidades radioconcéntricas). En el siguiente epígrafe, en las páginas 118 y 119 se proporcionan más detalles sobre este patrón. En la imagen inferior central (Bangkok, Thailandia) se observa un patrón agrícola regular formado por pequeños y alargados campos de arroz separados por centenarios canales de riego. Los campos de arroz se agrupan en lotes transversales entre sí. Por último, en la imagen inferior derecha se contempla un patrón agrícola típico en la ecorregión denominada Cerrado, en el centro-meridional de Brasil. La gran diversidad biogeográfica de esta área está amenazada por los monocultivos, especialmente, de soja. El bajo precio de las parcelas y la topografía de esta vasta llanura han facilitado la presencia de grandes explotaciones agrícolas formadas por grandes y regulares parcelas.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y
U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 168: Imagen ASTER, en falso color convencional, adquirida el 12 de junio de 2000 sobre la frontera entre los estados de California (Estados Unidos) y Baja California (México). En la esquina noroeste se observa la ciudad de El Centro (California) y en el centro-oriental de la misma se ubica la ciudad mejicana de Mexicali-Calexico. Aunque las fronteras geopolíticas entre países suelen ser líneas imaginarias, en ocasiones, debido a accidentes geográficos o a un modelo de ocupación del suelo diferente, estas fronteras pueden ser observadas con nitidez, incluso desde el espacio. En este ejemplo, el efecto frontera está realzado visualmente como consecuencia de una agricultura de regadío muy intensiva en el territorio estadounidense (colores rojos y formas regulares) frente a una agricultura más tradicional en el lado mexicano, en el que predominan los cultivos de secano y las parcelas sin cobertura vegetal (colores blancos y azules, texturas finas y un parcelario más desordenado). La agricultura de regadío es menos extensa debido a la falta de infraestructuras.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team







Figura 169 (arriba): Fotografía captada por un astronauta, desde la Estación Espacial Internacional, el día 7 de febrero de 2004 sobre el Campo de Dalías y El Ejido, en la provincia de Almería, España.

Sobre esta planicie litoral, situada al suroeste de la ciudad de Almería, entre la Sierra de Gádor, al norte y el mar Mediterráneo, al sur, en la que apenas se registran 200 mm. anuales de precipitación, se ha producido una de las más intensivas transformaciones del paisaje agrícola del sur de España. Desde los años 80 se ha instalado una agricultura intensiva bajo los plásticos de los invernaderos en una extensión de más de 20.000 hectáreas. Se trata de cultivos tempranos, de alto valor añadido, que compiten con los de otros continentes. Generan una actividad económica valorada en algo más de 1 billón de euros al año. Esta agricultura intensiva demanda una gran cantidad de aportes hídricos que es satisfecha por el acuífero subterráneo sobre el que se asienta. Los incensantes bombeos han hecho descender los niveles piezométricos del acuífero, provocando la intrusión de agua marina y un proceso de salinización del manto de agua subterránea. En la imagen se aprecia el intenso brillo de los plásticos que forman una mancha discontinua de color blanco.
Fuente: NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.

Figura 170 (abajo): Vista panorámica del Campo de Dalías, en la provincia de Almería, España, desde la Sierra de Gádor. Se observa, con claridad, la extensión que ocupan los invernaderos, en color blanco.
Fuente: JPG



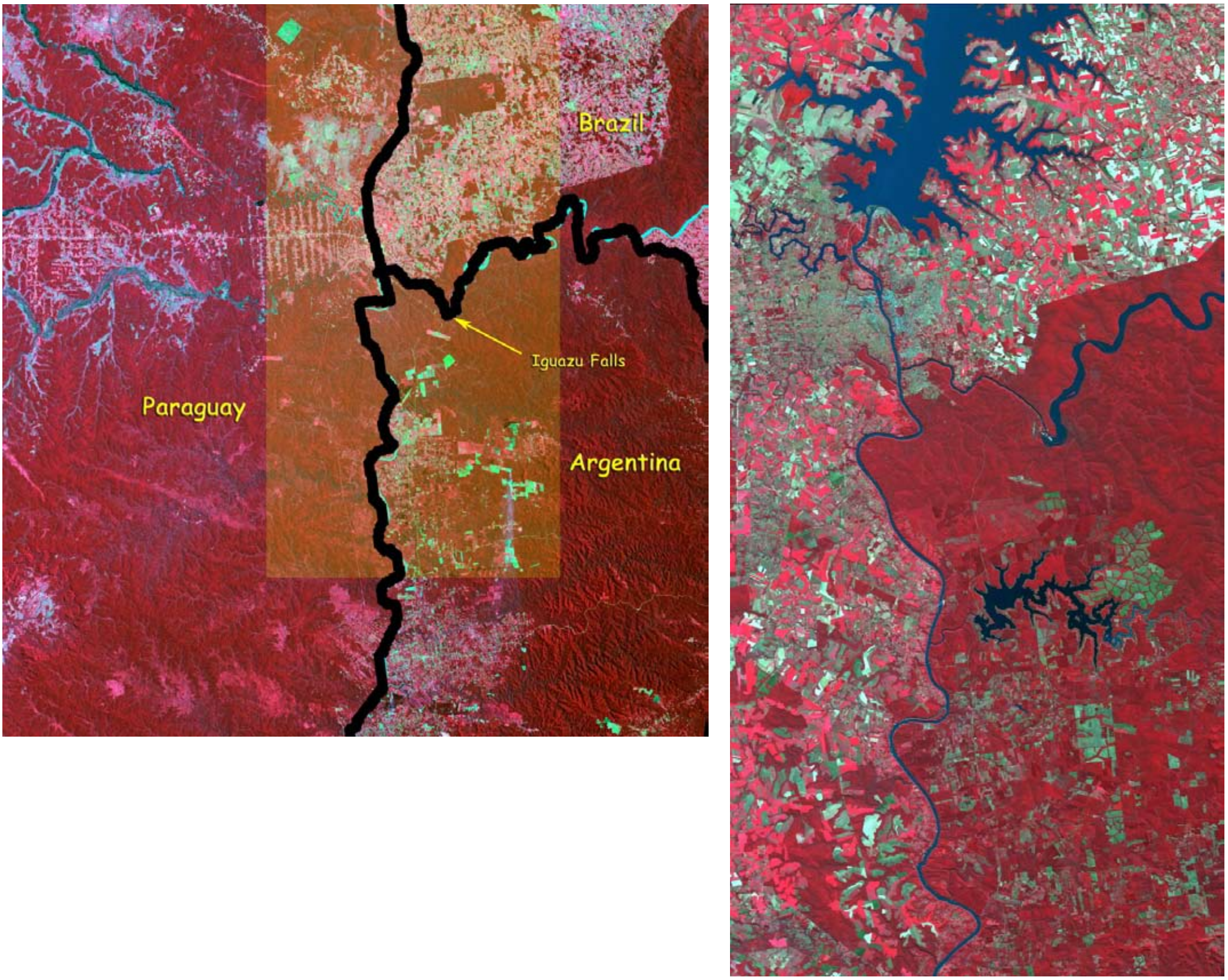




Figura 171: Conjunto de dos imágenes de satélite sobre las cataratas de Iguazú y la frontera entre Argentina, Brasil y Paraguay. La imagen de la izquierda ha sido adquirida, en 1973, por el sensor MSS a bordo de Landsat. La imagen de la derecha ha sido captada, en 2001, por el sensor ASTER. En la imagen de la izquierda se ha dibujado un rectángulo, de color naranja, para representar el sector común registrado desde los dos satélites.

En el sector centro-oriental se ubican las cataratas de Iguazú, sobre el río del mismo nombre, poco antes de su confluencia con el río Paraná que recorre la imagen en sentido norte-sur. Si se comparan, visualmente, ambas imágenes se puede apreciar que las transformaciones de los usos del suelo, entre 1973 y 2001, han sido muy desiguales en los tres países analizados. Nuevamente, el efecto frontera se hace patente desde el espacio.

En Argentina y en Brasil, la foz de Iguazú y su área de influencia se han protegido bajo la figura de Parque Nacional, a ambos lados de la frontera. En Argentina, los cambios han sido moderados. Se conserva razonablemente el bosque tropical original. En Brasil, se evidencia una notable diferencia entre el territorio incluido en el Parque Nacional y el que se encuentra fuera de él, mucho más presionado y transformado. Paraguay ha optado por un modelo de ocupación del territorio más permisivo, de forma que las masas de bosque tropical han sido ocupadas, masivamente, por tierras de cultivo. En la imagen Landsat ya se observa el comienzo del patrón típico de la deforestación en forma de espina de pez. Además, el gran embalse construido sobre el Paraná, en la frontera brasileño-paraguaya, es un cambio muy apreciable.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team.

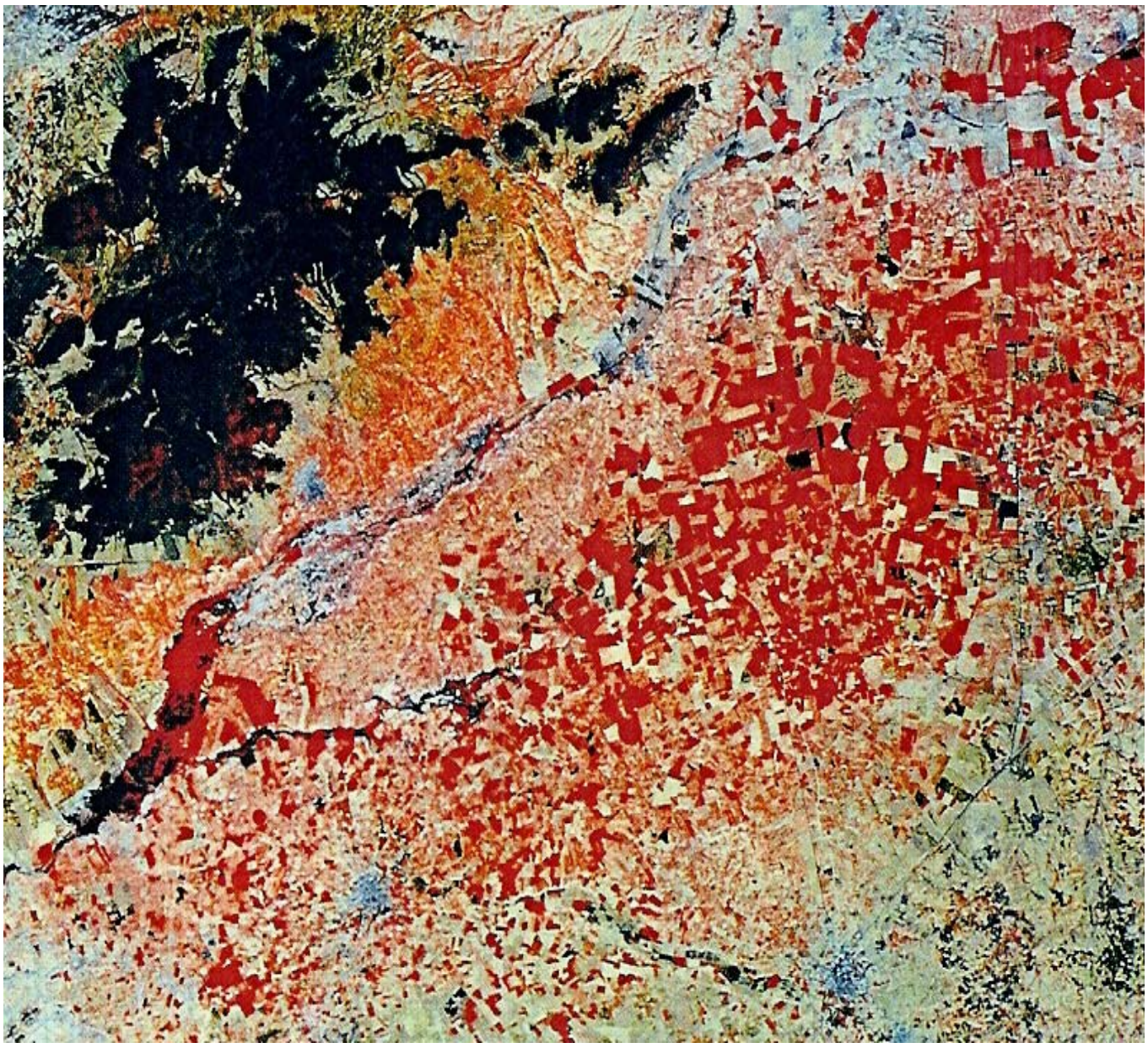
Figura 172: Imagen ASTER adquirida el 10 de mayo de 2000 sobre las ciudades de Palm Springs, al noroeste de la imagen, Cathedral City, en el centro, y Palm Desert, al sureste, localizadas a 160 km. al este de Los Ángeles, California.

Se trata de un falso color convencional (infrarrojo cercano, rojo, verde-RGB), de modo que la vegetación se observa en color rojo y los suelos desprovistos de cobertura vegetal se aprecian en una variedad cromática de blancos y azules.

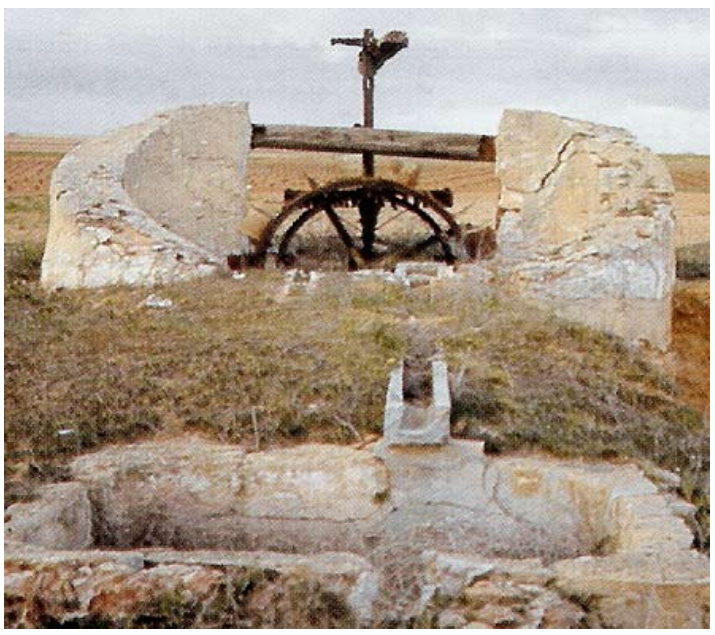
Estas ciudades están ocupadas por áreas residenciales de alto standing organizadas en cuadrículas trazadas regularmente. Entre las viviendas proliferan un buen número de campos de golf que tienen un color rojo intenso como consecuencia del vigor vegetal de los céspedes de los greens que rodean a cada hoyo. Además, se aprecia bien el típico patrón de, lo que llaman los especialistas, espaguetti, formado por las manchas alargadas y estrechas, de color rojo, de las calles que unen cada hoyo.

Fuente: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team









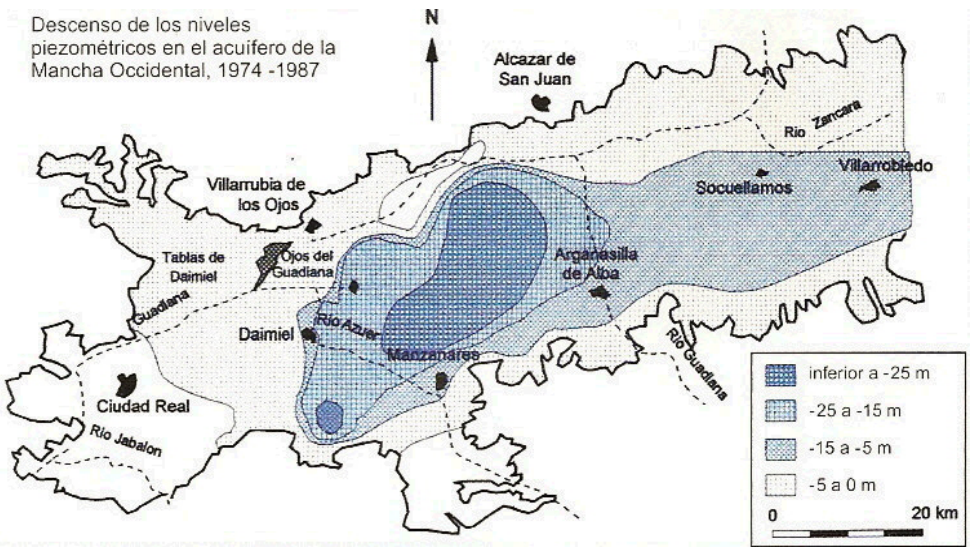


Figura 173 (arriba a la izquierda): Imagen Landsat TM en falso color convencional (TM432-RGB), adquirida en agosto de 1988 sobre el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel y sobre el acuífero 23, en La Mancha Occidental. En la esquina suroeste de la imagen, se observa la vegetación palustre en color rojo, en la confluencia de los ríos Gigüela y Guadiana. Entre los carrizales se aprecia las láminas de agua, en color negro, que inundan el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, humedal que alberga una importante población de aves. En color rojo intenso, textura fina y formas geométricas (cuadradas, rectangulares y circulares) se aprecia la gran extensión de los cultivos herbáceos y leñosos en regadío que alternan con los cultivos de secano (en colores blanco y verdes claros) sobre el gran acuífero 23, que cubre una extensión de 5.500 km^2. Las aguas subterráneas han sido los recursos que han propiciado la transformación de una agricultura tradicional de secano en otra más intensiva de regadío. El escaso control por parte de las autoridades administrativas ha desencadenado un desenfrenado incremento de las extracciones superando, continuadamente, las recargas naturales del acuífero. Los balances hídricos negativos acumulados motivaron, en 1987, la declaración de acuífero sobreexplotado. Desde 1987, se han implantado distintas medidas y planes (Plan de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, Plan de Compensaciones de Rentas, Plan Especial del Alto Guadiana) para recuperar los niveles del acuífero y para incrementar la superficie inundada de Las Tablas de Daimiel. Sin embargo, estos planes han tenido desigual éxito como consecuencia de no afrontar este problema ambiental desde su base.

Figura 174 (centro a la izquierda): Noria tradicional en La Mancha Occidental, España. Mediante un tiro animal, se extraían las aguas subálveas del acuífero 23. El balance tradicional entre las extracciones y las recargas naturales era positivo. La superficie regada era muy escasa.

Fuente: Juan Antonio Cebrián

Figura 175 (centro a la derecha): Los pivots son uno de los principales sistemas de riego empleados, actualmente, en La Mancha Occidental. Según las investigaciones realizadas en el marco del proyecto EFEDA, el descenso de los niveles piezométricos del acuífero 23, acumulados entre 1974 y 1987, ha llegado a los 35 m. en el sector central. Existen miles de pozos ilegales.

Fuente: Boletín del proyecto EFEDA: "Impacto de los cambios de usos del suelo, extracciones de aguas subterráneas y variabilidad de la precipitación en la hidrología de la cuenca alta del río Guadiana".

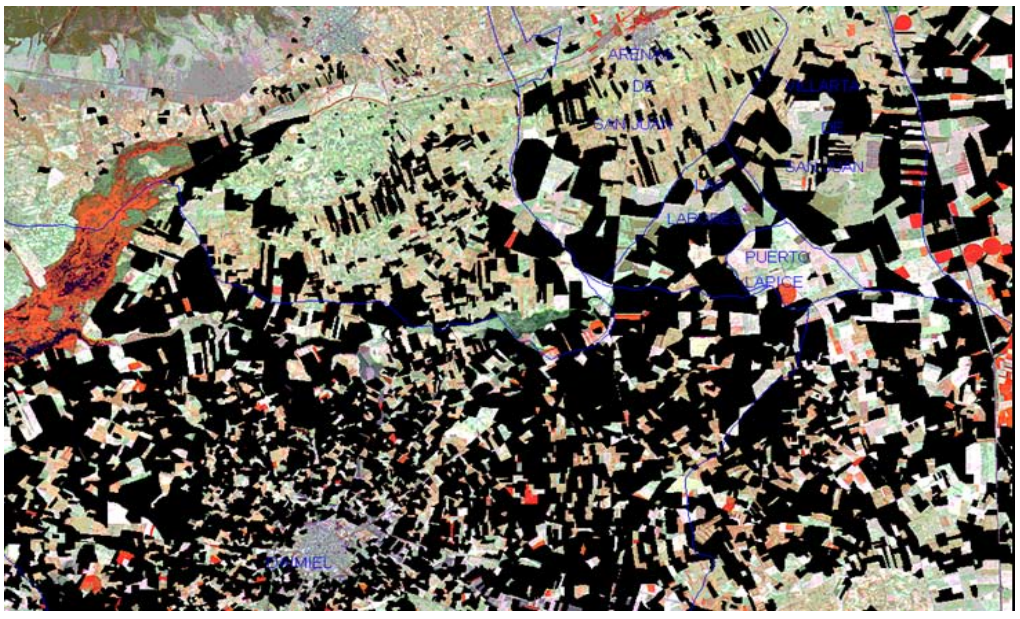


Figura 176: Imagen Landsat, en falso color mejorado (TM453-RGB), sobre el entorno del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, España. En la parte izquierda de la imagen se observa una mancha roja que se corresponde con la vegetación palustre del extremo norte del parque nacional. En su interior se aprecian las manchas negras características de las tablas, las superficies encharcadas.

La Teledetección espacial se ha utilizado para establecer mecanismos de control de los riegos. Con la ayuda de las funcionalidades de un SIG, a la imagen se le han superpuesto las parcelas (en color negro) que disponían de concesión administrativa para poder regar, en ese momento. Las parcelas que aparecen en color rojo son áreas que se están regando de forma ilegal.
Fuente: Montesinos y Bea, 2008

En algunas regiones semiáridas, la agricultura tradicional ha sido sustituida por otra más rentable pero poco adaptada a las condiciones ambientales del lugar. En un plazo temporal dado, estos modelos alóctonos se colapsan originando degradación ambiental y problemas socioeconómicos debido a su insostenibilidad. Este es el caso del ámbito geográfico de La Mancha Occidental y de Las Tablas de Daimiel (centro-sur de España).

La extensión del viñedo manchego en regadío ha pasado de 5.000 ha, en 1977, a más de 25.000 ha en 1990. Desde 1982, se ha producido, también, un fuerte incremento de la superficie dedicada a cultivos herbáceos en regadío. En general, la extensión de los herbáceos en regadío se mantiene, desde 1981, por encima de las 25.000 ha, superando las 49.000 ha en 1990. En la figura 167 se muestra, en color rojo intenso, la distribución de los cultivos en regadío que salpica toda la llanura manchega, intercalados entre los tradicionales cultivos de secano, en color blanco. La vegetación palustre también se observa en color rojo en la esquina suroeste de la imagen, en la confluencia de los ríos Gigüela y Guadiana. Entre los carrizales se aprecia las láminas de agua, en color negro, que inundan el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, humedal que alberga una importante población de aves. Asimismo, se registra un importante aumento de los cultivos forrajeros en las últimas décadas, durante las cuales se ha duplicado su extensión. Es la alfalfa la que destaca en la región, pasando de más de 6.000 ha, en 1982, a cerca de 12.000 en 1983.

El incremento de la superficie regada en la región ha provocado un aumento del volumen de agua extraída del acuífero. Desde 1977 se han superado los recursos renovables del acuífero (260 hm^3) hasta duplicarlos, a mediados de los años 80. Esta sobreexplotación acumulada del acuífero, resultado de los cambios de usos del suelo, ha propiciado la declaración definitiva de sobreexplotación del acuífero.

La consecuencia directa del proceso de explotación de los recursos hídricos subterráneos ha sido el descenso de la piezometría del acuífero 23 (figura 174). Desde 1974 a 1994 se ha producido un descenso medio total de 22 m en todo el acuífero, si bien en algunas zonas se superan los 35 m. El efecto socioeconómico inmediato es el encarecimiento de los costes que debe acometer un agricultor a la hora de poner en riego su explotación. Sin embargo, ambientalmente, existen otros efectos más graves (Martínez Vega y Echavarría, 2008).

Desde mediados de los años 90, la Confederación Hidrográfica del Guadiana realiza un seguimiento de la evolución hidrogeológica de La Mancha Occidental a partir de la observación de 21 puntos, distribuidos de forma homogénea por todo el acuífero. Puede decirse que se ha continuado la tendencia al vaciado. Se estima que, entre 1980-2004, podría haberse producido un vaciado de reservas de 2.800 hm^3.

Entre los impactos más visibles se encuentran la reducción de la superficie inundada de las Tablas de Daimiel, la desecación de lagunas y humedales, la desaparición de los cauces fluviales y de los Ojos del Guadiana y, por último, la pérdida de las turberas del Guadiana.

Al examinar la evolución de la superficie inundada en Las Tablas de Daimiel debemos distinguir dos períodos: uno de régimen natural hasta 1987, durante el cual el ecosistema sufría las consecuencias de la sobreexplotación del acuífero; y un segundo, desde 1988, donde las Tablas de Daimiel están sometidas a variaciones estacionales, ocasionadas por el aporte del agua derivada por el trasvase Tajo-Segura y a su pérdida por evaporación e infiltración. Esta alteración es un hecho lo suficientemente expresivo de la presión a la que ha sido sometido el acuífero 23 y la búsqueda de soluciones a los problemas ocasionados. La degradación del Parque Nacional ha producido la pérdida y reducción de la fauna y la flora.

Más clara es la desecación de las lagunas del oeste de Daimiel, conectadas hidrológicamente con el acuífero. Su transformación en espacios agrícolas nos puede dar una idea de la verdadera magnitud de los daños ecológicos que los cambios de usos del suelo han desencadenado.

Los ríos manchegos que atraviesan la zona (Gigüela, Záncara, Azuer, Jabalón, entre otros) se caracterizan por tener unos caudales más bien escasos, siendo en su mayoría estacionales, ligados a las precipitaciones más o menos abundantes y/o a los sobrantes del acuífero. Los escasos caudales de estos ríos y arroyos se han visto mermados por el intenso aprovechamiento del agro manchego. La duración de los estiajes desde los años 70 se ha hecho cada vez más prolongada en el tiempo, no tanto por la falta de precipitaciones, como por el abuso de los recursos hídricos. Los ríos ahora, cuando llevan agua, ceden rápidamente gran parte de su caudal al exhausto acuífero. Singular y dramático es el caso del río Guadiana, el cual con un caudal muy regularizado debido a su origen kárstico, ha desaparecido como consecuencia del descenso de los niveles piezométricos del acuífero 23.

Más espectacular, si cabe, es la desaparición de los Ojos del Guadiana y la destrucción de sus turberas. Su estado actual es una de las expresiones más dramática de las repercusiones ecológicas que ha sufrido esta zona. Lo que antes eran Ojos del Guadiana y humedales de Zuacorta han dejado paso a unas grandes áreas improductivas, perdiendo para siempre su singularidad y valor ecológico. Las turberas, explotadas no hace mucho en los alrededores de Zuacorta, hoy se pierden, pasto del fenómeno de combustión espontánea.

La intensiva aplicación de abonos químicos y productos fitosanitarios está ocasionando fuertes impactos en el medio natural. Es previsible la contaminación difusa del manto freático y preocupante su difícil regeneración. En caso de que, a medio plazo, se recuperen los niveles hídricos se hará patente este problema al entrar en contacto el agua con el suelo, saturado de productos químicos. Para mitigar este problema agro-ambiental los agricultores acogidos al Plan de Compensación de Rentas se comprometieron a reducir la aplicación de estos productos.

Desde el punto de vista socioeconómico, es evidente que estas transformaciones de la campiña manchega han repercutido en un incremento de las rentas agrarias a pesar de las elevadas inversiones que han tenido que realizar los agricultores, y su consiguiente endeudamiento, para proveer una infraestructura de riego particular que no ha sido asumida por la administración.

En resumen, estos cambios estructurales y morfológicos muestran el papel determinante que ha tenido la intensificación de la agricultura en el deterioro ecológico de la Mancha Occidental. Las Tablas de Daimiel sirven como “observatorio” para valorar la situación general que vive el Acuífero 23. En ellas hemos visto plasmado el intenso dinamismo que ha acompañado a esta región española y el paso de un sistema equilibrado o “sostenible” a una agricultura “insostenible” en menos de 50 años. Sin embargo, lo más grave es que el paisaje manchego, en tan corto espacio de tiempo y fruto de la intensa presión sobre el medio, ya da muestras de ese deterioro por la falta de planificación y la mala gestión de los recursos naturales.

6.2. PROCESOS DE DEFORESTACIÓN Y AVANCE DE LA FRONTERA AGRÍCOLA

En la actualidad, la deforestación es uno de los problemas ambientales más graves junto a la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y del aire y el cambio climático. El estado de conservación de los bosques influye sobre algunos problemas relevantes de los ecosistemas.

Los bosques tienen gran importancia como sumideros de CO_2 en el escenario actual de calentamiento global, como focos de biodiversidad y de conservación de la misma, como forma de proteger los suelos de la erosión, como almacén de agua, etc. Los bosques no solo son un importante sumidero de CO_2 sino que su destrucción que, en muchas ocasiones se produce por quema controlada, produce entre el 20 y el 25% de los gases de efecto invernadero.

La deforestación es uno de los problemas ambientales que más posibilidades de análisis presenta desde el punto de vista de la Teledetección.

El mercado de emisiones de CO_2, la producción de biocombustibles a gran escala y el aumento de la población y la globalización son fenómenos económicos que plantean interrogantes a medio y largo plazo sobre los bosques y pueden tener repercusiones muy importantes y sin precedentes en los mismos. En otro sentido, la educación, la acción de organismos internacionales y la cooperación con los países menos desarrollados, en un mundo globalizado, se plantea como una posibilidad de contrarrestar la deforestación.

En 1990, el planeta tenía una superficie forestal de 40.772.900 km^2. En el año 2000, se reduce a 39.886.100 km^2 y se vuelve a reducir a 39.520.250 km^2 en el año 2005, según datos de la FAO. Según este organismo, la superficie forestal y su variación anual, por continentes, es la siguiente:

Zona Geográfica	Superficie forestal (km^2)	Tasa de variación anual (%)	
	2005	1990-2000	2000-2005
África	6.354.120	-0,64%	-0,62%
Asia-Pacífico Asia Oriental Asia Sudoriental	7.342.430	-0,17% +0,81% -1,20%	+0,09% +1,65% -1,30%
Asia Central y Occidental	435.880	+0,08%	+0,03%
América del Sur y Centroamérica	8.599.250	-0,46%	-0,51%
América del Norte (incluye Groenlandia)	6.774.640	0,00%	-0,01%
Europa (incluye CEI)	10.013.940	+0,09%	+0,07%
TOTAL MUNDIAL	39.520.250	-0,22%	-0,18%

Fuente: Situación de los bosques del mundo, 2009, FAO.

Las tasas anuales de deforestación se duplicaron en 52 países tropicales en la década 1980–1990. Así pues, puede concluirse que las grandes reservas forestales del planeta, situadas en África, Sudamérica y el sudeste asiático (Asia sudoriental), están seriamente amenazadas. Por otra parte, la fertilidad de los suelos tropicales es menor que la de los suelos de zonas templadas por lo que la deforestación favorece la rápida erosión de los mismos, impidiendo la acumulación de nutrientes para plantear estrategias agrícolas a largo plazo.

El informe de la FAO también señala una fuerte correlación entre el desarrollo económico de los diferentes países y regiones y el estado de sus bosques. Los países que experimentan un rápido crecimiento económico suelen ejercer gran presión sobre sus recursos naturales y, en concreto, sobre los bosques. Frente a ellos, los países que han alcanzado un alto nivel de desarrollo económico estabilizan la explotación de sus recursos naturales, incluso incrementan, aquellos que pueden, la superficie de sus bosques, mediante políticas de reforestación.

Ahora bien, aún hay lugar para la esperanza, si se comparan las tasas de variación anual mostradas en la tabla anterior con las tasas de la década 1980–1990. A lo largo de ella, Asia–Pacífico perdió el 1,2% de su superficie forestal cada año, América del Sur y Centroamérica perdieron anualmente el 0,8% y África el 0,7%.

La situación en cada una de las regiones del mundo es la siguiente:

En África, la superficie forestal disminuye en todas las zonas del continente y de forma alarmante. Los principales desafíos que tiene el continente africano, en torno a la gestión de los bosques y al proceso de deforestación, son la gran dependencia de los recursos naturales para el desarrollo, que se agrava con el incremento de la población y el escaso control que ejerce el sector público, lo que genera talas ilegales. El aumento de la demanda de servicios ambientales (captura de carbono) plantea una oportunidad única al continente africano.

En Asia–Pacífico (Oceanía), la superficie forestal disminuye hasta el año 2000 y presenta un ligero repunte después de este año, a costa del aumento de superficie forestal en Asia oriental (China, Japón, etc), manteniéndose la deforestación en el resto del territorio, especialmente en la zona suroriental (Indonesia, etc). Las perspectivas de futuro son variadas. En los países desarrollados o en vías de desarrollo, las áreas forestales se estabilizan o, incluso, aumentan, mientras que, en los países menos desarrollados, las áreas forestales disminuyen como consecuencia de la expansión de la agricultura. Los países más poblados de la región tienen planteados graves problemas por la falta de tierras que podrían reducir las oportunidades de desarrollo y autosuficiencia.

En Europa, el balance es positivo a pesar de que, en los últimos años, en los países de esta última comunidad, ha disminuido la superficie forestal. Los recursos forestales seguirán aumentando por la preocupación de la población por el medio ambiente y por la existencia de un marco normativo e institucional sólido. Las diferencias, en materia forestal, que hay entre la Europa oriental y la Europa occidental tienden a desaparecer, a medida que la primera se iguala económicamente a la segunda.

En América del Sur y Centroamérica, la superficie forestal disminuye de forma importante. Las perspectivas de futuro dependen de los ritmos de diversificación económica y de los cambios en la dependencia de la tierra de los diferentes países. El aumento de la urbanización supondrá el progresivo abandono de la agricultura y la disminución de la deforestación. Algunas zonas dedicadas a la agricultura, a pequeña escala, volverán a convertirse en bosques. Un desafío importante, en algunos países de esta región, para la ordenación sostenible de los bosques es la definición de la tenencia de la tierra. La demanda de servicios ambientales proporcionados por los bosques (captura de carbono) puede ser una interesante oportunidad, aunque ello supondrá una mejora del marco normativo e institucional.

En América del Norte, la superficie forestal disminuye en Méjico, aumenta en EE.UU. y se mantiene en Canadá. El futuro de la superficie forestal en México depende de la velocidad de transición desde la economía agraria a la economía industrial. El interés y preocupación de la población por los bosques es creciente. Numerosas instituciones norteamericanas protagonizan iniciativas de conservación a escala regional y mundial.

En Asia central, la superficie forestal aumenta ligeramente, aunque se trata de la región con menor cantidad de bosques del mundo. La prestación de servicios ambientales (freno de la desertificación, protección de cuencas hidrográficas) puede ser la principal justificación para la actividad forestal.

La crisis económica que experimenta el mundo, desde finales de 2008, ha repercutido en el sector de la vivienda, en el sector financiero y en el empleo pero también ha tenido repercusiones en los bosques. Se ha reducido la demanda de madera y productos forestales y el mercado de servicios ambientales (mercado de emisiones) se hace más inestable y volátil. Igualmente se han reducido las inversiones en ordenación forestal sostenible. Asimismo, la crisis tiene repercusiones en los países en vías de desarrollo, cuya economía depende más de sus recursos

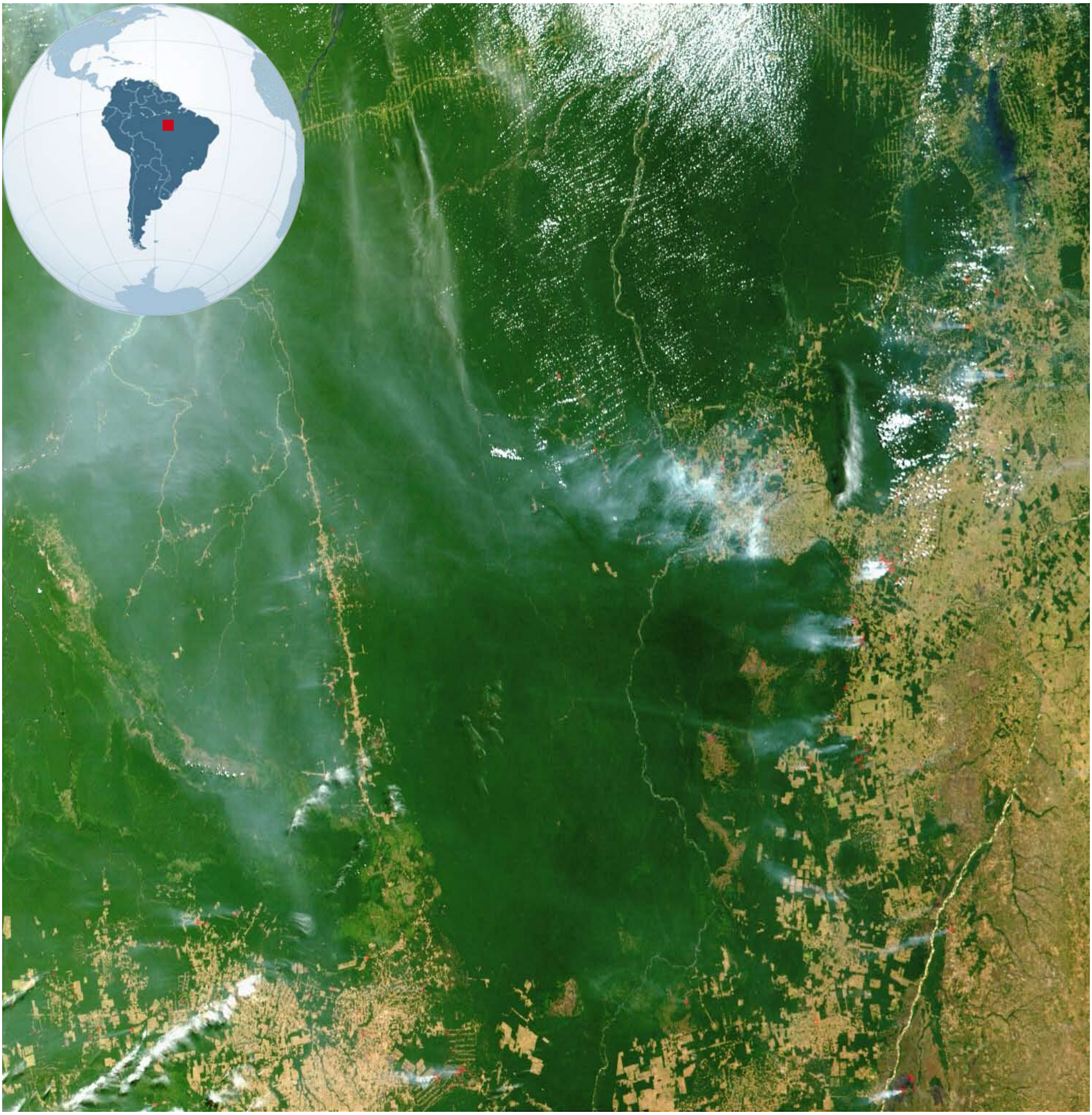


Figura 177: BRASIL, Estado de Pará. Imagen MODIS, en color natural, captada desde la plataforma TERRA el 24 de agosto de 2001. Cortesía de Jacques Descloitres. MODIS Land Rapid Responses, NASA/GSFC.

naturales.

La demanda de madera no volverá fácilmente al máximo de 2005-2006 y la bajada de los precios de los productos agrícolas del segundo semestre de 2008 puede reducir la superficie agraria en beneficio de la superficie forestal. El precio de la soja tiene una correlación directa con la deforestación en la cuenca del Amazonas. En resumen, la crisis económica también puede influir en el aumento de la explotación de madera ilegal como ocurrió en el sudeste asiático en 1997-1998.

No obstante, el sector forestal podría aprovechar el cambio de ciclo económico para reestructurar el mercado, reforestar, promocionar las prácticas sostenibles y las energías renovables.

Los desafíos más importantes que presenta la gestión de los bosques en el momento presente y en el futuro inmediato son los siguientes:

- Desarrollo de la legislación y de la capacidad institucional de protección.
- Participación de las comunidades locales y de organismos internacionales en la gestión de los recursos.
- Lucha contra la tala ilegal y el comercio ilegal de madera.
- Reducción de la demanda de madera y, en su caso, sustitución de la misma por madera certificada.
- Avance y mejora de la accesibilidad al conocimiento científico–técnico (a todo tipo de propietarios) en la gestión de los bosques.
- Apoyo a la ordenación sostenible de los bosques.
- Fomento del reciclaje, la reforestación y de las energías alternativas.
- Prevención de los incendios forestales que, cada vez, son más frecuentes y severos.
- Control de los perjuicios causados por plagas y especies invasivas.

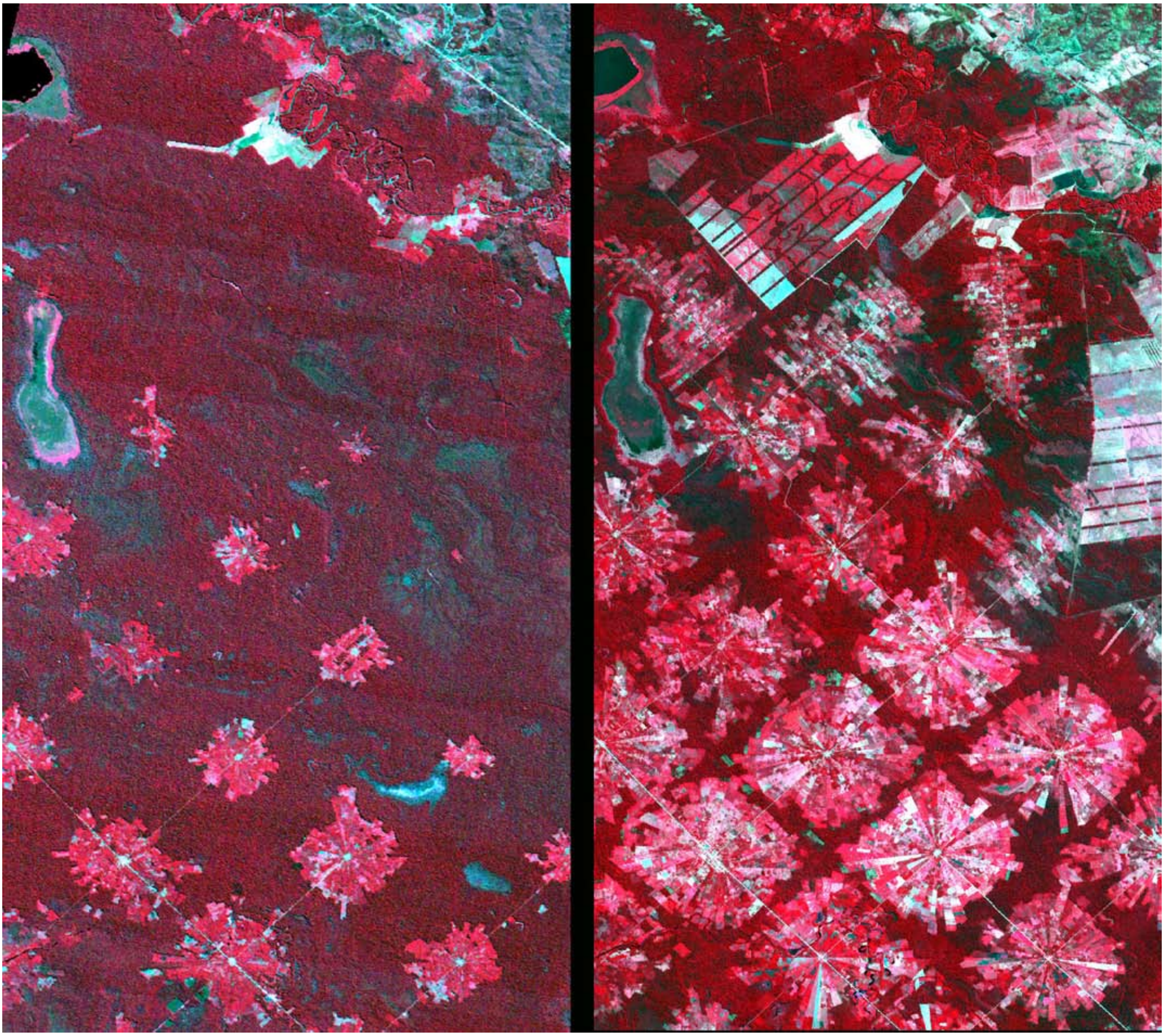


Figura 178: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Izquierda: Imagen LANDSAT en falso color, adquirida el 4 de agosto de 1986. Derecha: Imagen ASTER en falso color, captada el 11 de agosto de 2001.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

El conjunto gráfico de arriba ofrece una secuencia temporal de un mismo ecosistema que ilustra, de forma indiscutible, el intenso proceso de deforestación del bosque tropical y el avance continuo de la frontera agrícola, en tan sólo quince años.

A la izquierda, se muestra una imagen Landsat tomada el 4 de agosto de 1986. A la derecha, una imagen Aster, captada el 11 de agosto de 2001, permite, al lector, efectuar una comparación con la anterior y hacerse una idea de la magnitud del proceso. Ambas imágenes están centradas en torno a la coordenada 17º latitud S y 63º longitud O. El área cubierta por cada una de ellas es de 616 km^2.

Las imágenes muestran la parte oriental de la planicie amazónica de Bolivia, en concreto la zona situada al noreste de Santa Cruz de la Sierra (Bolivia), situada a una altitud de unos 400 m. sobre el nivel del mar, a orillas del río Grande.

La migración de la población, desde el altiplano boliviano, que se está produciendo desde mediados de los años 80 y un amplio desarrollo agrícola han contribuído a la creciente deforestación de esta zona. El proyecto Tierras Bajas del Este (Urioste y Pacheco, 2001) fue financiado, entre 1990 y 1997, por el Banco Mundial con el objetivo de incrementar la producción agropecuaria. Asimismo, pretendía favorecer la permanencia de las comunidades indígenas en sus territorios tradicionales. La producción agrícola de la zona se centra en la soja. Su cultivo empezó, con más intensidad, a comienzo de los años 70. El posterior aumento de los precios ha retroalimentado la producción agrícola y, por consiguiente, la deforestación.

La imagen Aster muestra dos tipos de patrones de cultivos, claramente diferenciados:

- Agrupaciones radioconcéntricas situadas en torno a una pequeña comunidad que cuenta con iglesia, escuela y café-bar, entre otros equipamientos. La economía de estas comunidades agrícolas se fundamenta en la comercialización de la soja. Desde el centro de la comunidad, se va rozando el bosque en sentido radial. Este patrón forma parte del esquema de ocupación planificado en los asentamientos de San Javier y de La Victoria. Cada agrupación está separada de su vecina unos 5 km.
- Parcelas con forma rectangular, al N y E de la imagen Aster que se dedican, igualmente, a la producción de soja aunque dedicada a la exportación. Las parcelas son más grandes. Los cultivos se financian con préstamos extranjeros. Las líneas más oscuras que separan unas parcelas de otras son protecciones contra el viento ya que los suelos, en esta zona, son finos y proclives a la erosión eólica.



Figura 179: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Fotografía tomada el 16 de abril de 2001, desde la Estación Espacial Internacional (ISS), con una resolución espacial de 6 m.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/

La superficie de bosque tropical que resta en 2001, entre cada una de las agrupaciones concéntricas, es mucho menor que en 1986. Las imágenes muestran cierta planificación u ordenación en la zona, sobre todo en las agrupaciones radioconcéntricas, a las que, posteriormente, se añaden las explotaciones con forma rectangular.

Bolivia ha perdido una superficie forestal de 270.000 hectáreas en el quinquenio 2000-2005, a un ritmo anual de deforestación del 0,5%. Esta cifra significa que el 6% de la superficie deforestada en toda América Latina y el Caribe en ese mismo periodo se localiza en tierras bolivianas.

Así pues, la deforestación y la reducción del bosque tropical húmedo se produce, igualmente, y a mayor escala, en otros países de Sudamérica como Brasil y en países del sudeste asiático como Indonesia. A continuación, veremos unos ejemplos. Este fenómeno preocupa, especialmente, a la comunidad científica y a los gestores del territorio ya que contribuye, intensamente, a agravar los procesos globales del cambio climático y del efecto invernadero, entre otros.

A pesar de estos datos, desde los años 90 comienza a atisbarse, tímidamente, una corriente, de signo contrario, a la descrita hasta ahora. La ley forestal de Bolivia, de 1996, exige que las explotaciones forestales, incluso aquellas que se encuentran en tierras comunitarias tradicionales, dispongan de un plan de gestión sostenible. Desde entonces, incluidas las comunidades indígenas, los productores de madera comienzan a manifestar interés por los sistemas de certificación, por los mercados internacionales de la madera, las organizaciones no gubernamentales, los planes de gestión y los Sistemas de Información Geográfica. Parece una buena oportunidad y un buen contexto para frenar el proceso intensivo de destrucción del bosque tropical y revertir la tendencia por otra que comience a sustituir el modelo anterior por un sistema de introducción de buenas prácticas en la gestión forestal. Aunque queda mucho camino por recorrer, este cambio de signo resulta alentador para la comunidad indígena Yuquí, entre otras, y para la comunidad internacional, preocupada, en términos globales, por el estado del Medio Ambiente.

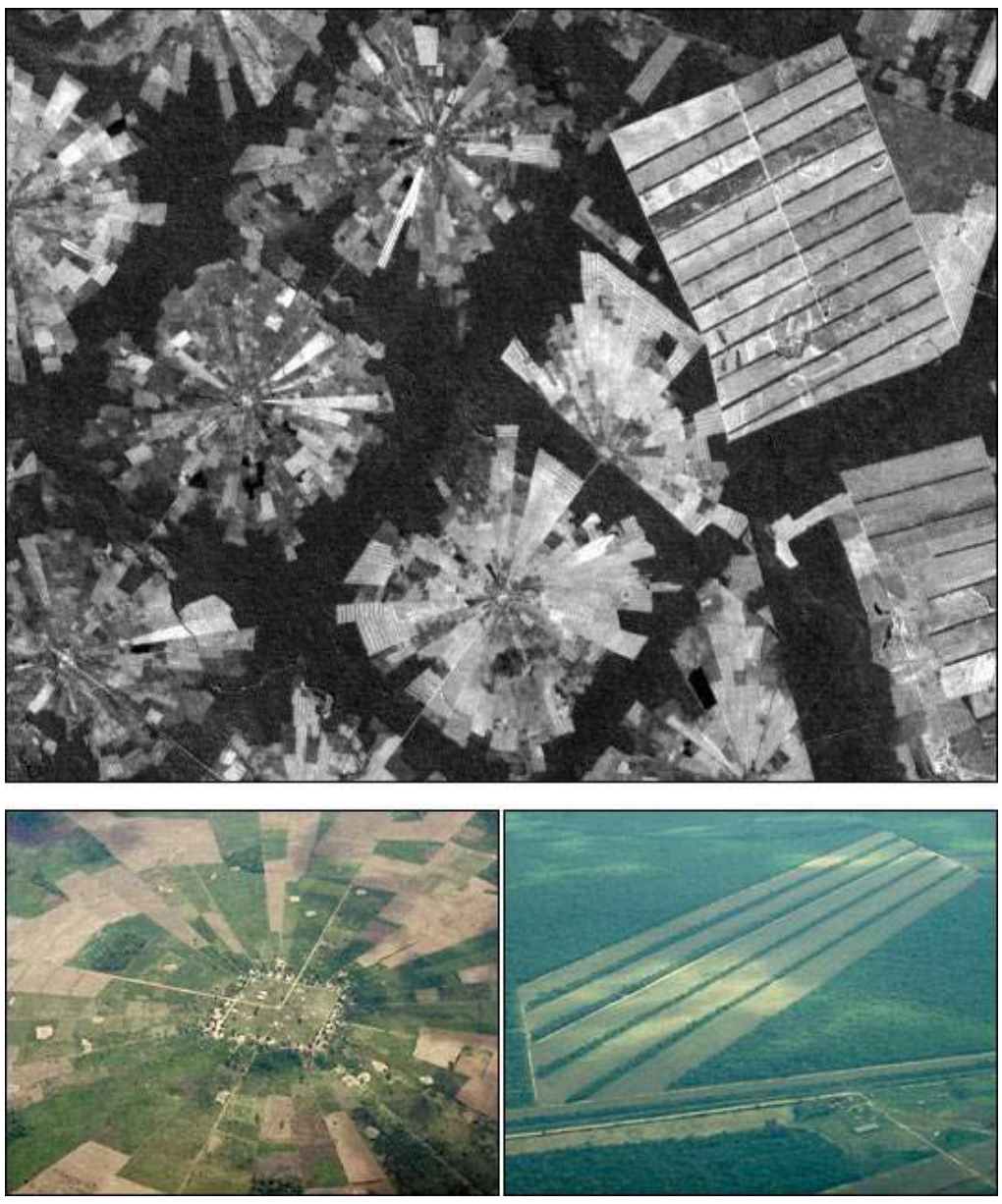


Figura 180: SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA. Vista de una imagen Landsat-7, captada el 8 de enero de 2000, y vistas oblicuas de campo sobre el asentamiento de San Javier.
Fuente: www.visibleearth.nasa.gov/

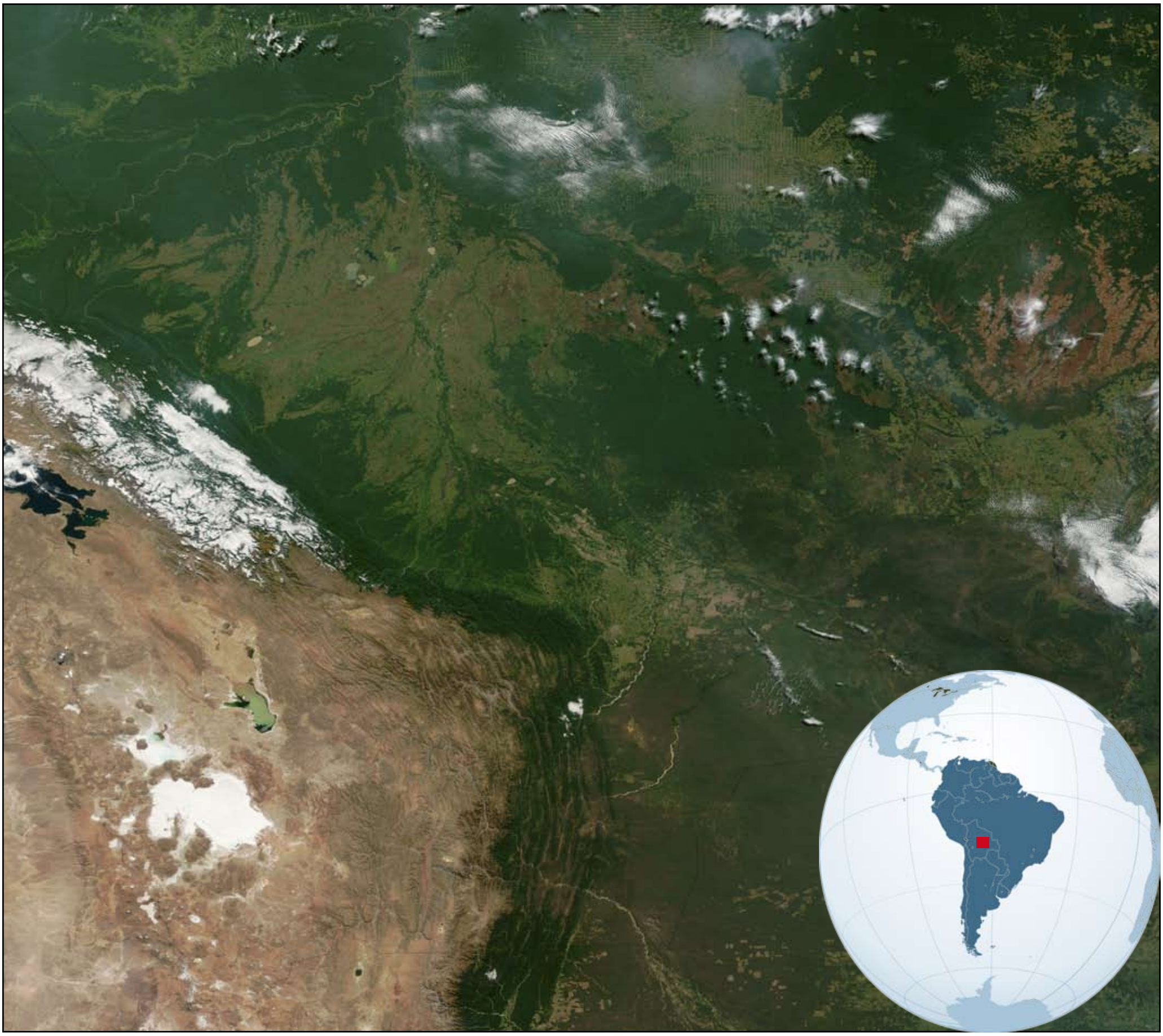


Figura 181: BOLIVIA. Imagen MODIS, en color natural, captada desde la plataforma TERRA el 20 de junio de 2002. Cortesía de Jacques Descloitres. MODIS Land Rapid Responses, NASA/GSFC. http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=3261

La figura 181 muestra la selva amazónica en Bolivia y sur de Brasil (Mato Grosso). Gracias al amplio campo de visión del sensor MODIS, se observa, en la misma imagen, el norte de Paraguay, Argentina, Perú y Chile. La zona está frecuentemente cubierta de nubes por lo que es difícil la captura de imágenes de satélite de una zona tan extensa sin nubes.

La zona árida, al oeste de la imagen, se corresponde con el Altiplano boliviano y la cordillera de los Andes. La zona lacustre que se aprecia en esta zona, en color negro, es el lago Titicaca, en la frontera entre Perú y Bolivia, cerca de la capital boliviana de La Paz. Al sureste de éste, igualmente en el Altiplano, se ve otra zona lacustre que se corresponde con el lago Poopo, en las proximidades de la ciudad boliviana de Oruro.

El lago Titicaca es uno de los lagos más grandes de América. Ocupa una superficie de 8.562 km^2 y es de agua salada. Es el lago navegable situado a mayor altura del mundo (3.800 m) y tiene más de 300 m de profundidad.

El lago Poopo tiene un área de 2.337 km^2. Su salinidad es superior a la del Titicaca. En la imagen se observa en color verde claro como consecuencia de su alto grado de eutrofización. Ambos lagos están conectados por el río Desaguadero que termina en los saladares de la zona oeste de Bolivia y que nunca ha tenido salida al mar.

El río Amazonas discurre, de oeste a este, por la zona norte, fuera de la imagen.

La imagen presenta tres grandes ecosistemas:

1. El altiplano: es la zona más árida, con grandes variaciones de temperatura entre el día y la noche y escasas precipitaciones.
2. La selva amazónica: es la zona con más vegetación, con temperaturas más altas y menor variabilidad entre el día y la noche. En ella se producen abundantes precipitaciones.
3. Zona mixta de bosques y estepas: se trata de una zona templada y húmeda, con grandes variaciones de temperatura entre estaciones y escasas lluvias.

Bolivia produce diversos productos agrícolas como soja, café, algodón, maíz y caña de azúcar. Adicionalmente, es uno de los principales exportadores de madera tropical.

La parte de la imagen que se corresponde con la selva amazónica presenta varios tonos de verde que reflejan el diferente grado de deforestación.

La estructura de parcelas deforestadas es visible desde el satélite y los patrones más importantes son los siguientes:

1. Zona central de la imagen que se corresponde con Bolivia. Las parcelas tienen forma, aproximadamente, circular y, a su vez, se agrupan formando una red. Estas parcelas se organizan en torno a fuentes de agua y pequeños núcleos de población. El ecosistema deforestado es la selva.
2. Zona septentrional de la imagen que forma parte del territorio de Brasil. Las parcelas tienen forma cuadrada o rectangular y se agrupan linealmente en torno a vías de comunicación principales y secundarias, ríos, etc. El patrón de crecimiento de la deforestación se conoce como “espina de pez”. El ecosistema deforestado es la selva.
3. Zona meridional de la imagen, ocupada por territorios de Bolivia, Argentina, Paraguay y Brasil (Gran Chaco). Las parcelas tienen forma cuadrada o rectangular y se agrupan en torno a núcleos de población, estancias y vías de comunicación. El ecosistema deforestado es una mezcla de bosque y estepa.

Los patrones de deforestación se pueden observar mejor en imágenes de mayor resolución espacial (figuras 182 y 183).





Figura 182: BRASIL. Imagen MERIS, captada desde la plataforma europea ENVISAT el 30 de mayo de 2006. La escena se corresponde con un sector de la cuenca del río Xingu, afluente del Amazonas, por la derecha, en el estado de Pará.

Se aprecia el fuerte contraste entre las masas de bosque lluvioso ecuatorial (en verde en la imagen) y las desordenadas parcelas agrícolas, de bordes geométricos y colores ocres y amarillos, ganadas a la pluvisilva. Esta imagen es una muestra más del intenso proceso de deforestación que sufre este país y que amenaza su diversidad biogeográfica.

Fuente: ESA.

Figura 183: ESTADO DE RONDONIA, BRASIL. Imagen ASTER en falso color, adquirida el 24 de agosto de 2000, en las inmediaciones del río Jiparaná.
Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



La figura 183 muestra, claramente, la huella de la deforestación sobre el paisaje del estado de Rondonia (Brasil), a orillas del río Ji-Paraná o río Machado, que desemboca en el río Madeira, afluente, a su vez, del Amazonas. El afluente por la izquierda que también se observa en la imagen es el río Jaru.

La imagen fue obtenida por el sensor ASTER, en agosto de 2000, y cubre un área aproximada de 2500 km^2. El territorio observado se sitúa al oeste de la ciudad de Ariquemes y al norte de la ciudad de Ji-Paraná.

La imagen combina los canales infrarrojo, rojo y verde, resultando una composición en falso color, por lo que la vegetación se aprecia en color rojo y las zonas desprovistas de vegetación, más áridas, se ven en color marrón y rojo más claro. Las zonas de color gris–negro han sido quemadas recientemente.

El aumento de la deforestación se produce a partir de ejes paralelos entre sí, en torno a un eje principal. Este patrón de crecimiento se denomina “espina de pez” y se produce en torno a vías de comunicación (carreteras), ríos y fronteras administrativas (el río Machado en ocasiones es frontera administrativa con el estado de Mato Grosso). La deforestación

disminuye a medida que nos alejamos de los núcleos de población que, en este caso, están al sur y al oeste.

La deforestación se produce por quema "controlada" o por tala y comercialización de la madera. Las parcelas resultantes se dedican, posteriormente, a la agricultura y a la ganadería.

El Estado construyó, en los años 60, la carretera BR-364 que une Cuiaba (Mato Grosso) con Porto Velho (capital del estado de Rondonia) y que atraviesa el estado de Rondonia, pasando por Ji-Parana y Ariquemes. La carretera contribuye al desarrollo de la región, que antes estaba ocupada por indígenas, pero a la vez facilita la deforestación de la misma.

Los grupos ecologistas locales e internacionales y otros grupos de acción social se oponen al asfaltado de las carreteras y a la construcción de otras infraestructuras (presas hidroeléctricas aprobadas por el gobierno regional) para no facilitar el acceso a zonas no taladas y dificultar la deforestación. El IBAMA (Instituto Brasileño de Medio Ambiente) constata, en sus informes, el aumento de las áreas deforestadas en los márgenes de las carreteras fruto de la actividad de madereras ilegales.

En 1975, la región aún presentaba grandes extensiones de pluvisilva intacta y no es hasta 1989 cuando se aprecia el típico patrón de "espina de pez". Durante los años 80, en el conjunto de Brasil, la deforestación supuso la eliminación de 15.000 km^2 de bosques al año, lo que equivale a la destrucción anual del 0,31% de su superficie forestal nacional. Para establecer una referencia conviene decir que la superficie geográfica de Brasil es de 8,5 millones de km^2 y su superficie forestal está cercana a los 4,8 millones de km^2. Aunque proporcionalmente no parezca una superficie muy grande, en términos absolutos sí lo es. Una comparación servirá. Ese ritmo de deforestación significa destruir anualmente masas forestales equivalentes al doble del tamaño de la Comunidad de Madrid.

Rondonia es uno de los estados brasileños cuyo índice de deforestación es más alto, aunque las cifras oficiales de áreas deforestadas no concuerdan, en modo alguno, con la realidad de la zona, puesta de manifiesto en la imagen. Los datos oficiales señalan que la deforestación creció más de un 600% entre 2006 (42 km^2) y 2007 (295 km^2), afectando, sobre todo, a la zona del estado que limita con Bolivia (al sur de la imagen). Los datos oficiales y las imágenes de satélite reflejan que Rondonia está desplazando a Mato Grosso en el primer puesto de los índices de deforestación de Brasil. El principal problema de esta devastación, según la directora del IBAMA, es que *"las personas actúan con la idea de que la tierra no es de nadie"*. En resumen, la deforestación se hace evidente en las imágenes de satélite obtenidas con pocos meses de diferencia.

La secuencia de imágenes expresa gráficamente el proceso de deforestación que sufre Indonesia y, especialmente, la isla de Sumatra. En 1992, el cuadrante nororiental de la imagen se encontraba cubierto por un espeso bosque tropical que se observa en color verde oscuro. Sin embargo, nueve años después, se han abierto grandes claros en este sector. Las manchas rojas y ocres son tierras bajas donde se han producido las talas masivas. En la vecina provincia de Riau, al norte, han sido deforestados 4,2 millones de hectáreas de bosque tropical y de zonas pantanosas (turberas) en los últimos 25 años. Según datos de la FAO (2009), entre 2000 y 2005 Indonesia ha perdido una superficie forestal de 1.871.000 hectáreas, a un ritmo anual del 2%. Estas cifras significan que en Indonesia se ha producido el 67% de la deforestación ocurrida entre 2000 y 2005 en toda Asia Sudoriental y el 25% de la deforestación mundial durante ese mismo periodo.

Este proceso está provocando la desaparición de los hábitats de especies vulnerables o en peligro de extinción como los elefantes, orangutanes, rinocerontes o los tigres de Sumatra, así como incrementos significativos de las emisiones de CO_2 como consecuencia de los incendios y de la combustión de la turba.





Figura 184: SUMATRA, INDONESIA. Secuencia de dos imágenes en falso color (infrarrojo próximo, medio y verde, RGB). Arriba, imagen captada por el sensor Thematic Mapper, a bordo de Landsat 5, el 22 de junio de 1992. Abajo, escena tomada el 14 de enero de 2001 por el sensor ETM+ de Landsat 7. La zona observada se encuentra en la isla de Sumatra, aproximadamente, a 100 km., al suroeste de la capital provincial de Jambi.

Fuente: Tropical Rain Forest Information Center (TRFIC), Basic Science and Remote Sensing Initiative (BSRSI), Michigan State University and the Landsat 7 Project Science Office at NASA Goddard Space Flight Center

6.3. INCENDIOS FORESTALES

El fuego resulta determinante para entender globalmente la distribución y evolución de los sistemas vegetales sobre la Tierra. Sin embargo, la extensión, frecuencia e intensidad que han adquirido los incendios forestales en las últimas décadas han convertido este fenómeno en uno de los principales problemas ecológicos en el ámbito global por su repercusión sobre el medio ambiente natural y social. Los incendios forestales se han convertido en un importante factor de transformación ambiental llegando a modificar, en ocasiones de forma radical, la composición y estructura de las formaciones vegetales, los ciclos biogeoquímicos y la hidrología, al tiempo que desempeñan un papel destacado en el cambio global por las emisiones de gases y su efecto transformador del paisaje.

Los efectos ecológicos de los incendios son múltiples y se reflejan, de forma directa o indirecta, a diversas escalas y en todos los componentes del sistema:

1. En la atmósfera

La producción de gases y partículas durante la combustión de la vegetación puede alterar substancialmente la calidad del aire a escala local, regional y global, la química y fotoquímica atmosférica y el clima de nuestro planeta. Los incendios forestales en los trópicos se han incrementado notablemente en la última década debido a la aceleración del proceso de deforestación (controlada e incontrolada), provocada en su mayor parte por el aumento de la presión demográfica en los países del tercer mundo, que ha forzado la expansión de las zonas agrícolas en África, el Sudeste de Asia y América del Sur. La emisión de partículas y gases por estos incendios es un importante proceso atmosférico que afecta a la química troposférica a escala global.

2. En la vegetación

En conjunto, la vegetación acusa muy severamente el paso del fuego. Dependiendo de la temperatura del incendio y de la velocidad de propagación, las especies perecen o ven reducida su biomasa viva y la compleja estructura de la comunidad vegetal se desmorona o se modifica profundamente. Las especies herbáceas quedan destruidas tras el incendio y de las arbustivas desaparece, al menos, la parte aérea. Por lo que respecta a las especies arbóreas, los troncos no suelen consumirse, y lo mismo ocurre con los elementos subterráneos situados a profundidades superiores a 5 cm. Sin embargo, las semillas de la mayor parte de las especies mueren y sólo las de algunas especies, más adaptadas, logran sobrevivir. Las altas temperaturas registradas durante el incendio en áreas próximas, cuya vegetación no fue afectada por las llamas, puede provocar, además, la muerte de muchos árboles, aparentemente no afectados, con posterioridad al incendio. En cualquier caso, el incendio produce un debilitamiento de la vegetación que puede traducirse en un retraso del crecimiento y en una mayor exposición a los ataques de hongos e insectos, que constituyen, además, una amenaza potencial para los árboles vecinos.

Sin embargo, la importancia de los incendios como causa de perturbaciones en la vegetación depende, en gran medida, del patrón temporal de incidencia e intensidad que prevalece en el área, de la estación en que se produzcan y del tipo de vegetación a la que afecten. Cuando el incendio es un evento poco frecuente, la vegetación no está adaptada y el incendio puede destruir individuos y especies. Sin embargo, cuando el incendio es un evento recurrente, la mayoría de las especies están adaptadas a través de estrategias de supervivencia. No obstante, también en este caso se puede producir la extinción de determinadas especies si se produce un cambio brusco en la frecuencia y/o intensidad de los incendios. Algunas especies pueden llegar a extinguirse si la frecuencia de incendios aumenta con respecto al patrón temporal al que estaban adaptadas. Es el caso de aquellas especies que necesitan un período de tiempo determinado para alcanzar la madurez reproductiva. Si el incendio se produce antes de que esto suceda, esta especie puede quedar eliminada de la comunidad. Existe también el caso contrario, es decir, especies que pueden desaparecer cuando la frecuencia de incendios es menor que la requerida para sobrevivir. Es el ejemplo de las especies oportunistas que aparecen después del incendio y que requieren incendios sucesivos para estar presentes en la comunidad.

Además de los efectos directos en el arbolado y en el sotobosque, a la larga se producen consecuencias menos espectaculares pero igualmente importantes sobre la zona afectada por el incendio, ya que el fuego rige el dinamismo posterior de la vegetación. En zonas donde la frecuencia de incendios es relativamente alta, como ocurre en la mayor parte de las masas forestales mediterráneas, la recurrencia de incendios da lugar a una progresiva adaptación de la vegetación, determinando la aparición de especies pirófilas (favorecedoras del fuego) y pirófitas (resistentes al fuego). De esta manera, el fuego deja de ser, en algunas regiones, un factor globalmente negativo para pasar a convertirse en necesario para el mantenimiento de algunas comunidades. Ello permite explicar la dominancia en algunos ecosistemas, de especies teóricamente menos competitivas, pero con mayor grado de adaptación al fuego.

3. En el suelo

Los impactos de los incendios sobre el suelo se han considerado muchas veces como el mayor daño que se deriva de ellos. El suelo, además de ser un bien escaso, sobre todo en las zonas montañosas o en las áreas forestales en general, donde ya resulta muy somero y empobrecido, constituye el sustento básico de la vegetación. El deterioro en alguna de sus cualidades resulta casi siempre muy difícil o imposible de recomponer.

Una primera consecuencia del incendio sobre el suelo es el efecto de hidrofobia que desencadena y que suele venir acompañado por una disminución de su conductividad hidráulica y de la porosidad, lo que favorece la escorrentía y la evaporación. El resultado de estas alteraciones puede ser una reducción de la disponibilidad de agua por las plantas y una pérdida de materiales y de componentes biológicos por el suelo.

Por otra parte, al quemarse la materia orgánica vegetal se produce una mineralización rápida y, por tanto, un inmediato enriquecimiento nutritivo del suelo. Sin embargo, estos nutrientes se pierden fácilmente, bien por disolución en las aguas de escorrentía o con la erosión de las partículas del suelo y, en poco tiempo, su fertilidad está incluso por debajo de los valores anteriores al incendio.

Después del incendio el suelo queda desprotegido y, en algunos casos, claramente debilitado en su capacidad de amortiguar los impactos de los agentes erosivos. La falta de vegetación provoca el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie desnuda, aumentando los efectos erosivos, pues gran parte de la energía cinética de cada gota de lluvia, que antes era absorbida por la vegetación, es ahora utilizada para desagregar la estructura del suelo.

La ausencia de vegetación provoca, además, una reducción de las tasas de infiltración, aumentando la velocidad de escorrentía de los caudales líquidos y sólidos, con lo que se incrementa también el poder erosivo de los mismos. La intensidad de los procesos erosivos desencadenados como consecuencia de un incendio, depende del grado de erosión previo. Es un proceso que se autoacelera por repetición, pues a medida que se intensifica la erosión, el suelo se desagrega más fácilmente. Por esta razón, una alta frecuencia de incendios puede ser particularmente grave, al impedir que la recuperación de la cubierta vegetal sea suficiente como para frenar los procesos erosivos derivados de la ausencia de vegetación, sobre todo en zonas con suelos fácilmente erosionables donde la pérdida

Figura 185: Imagen MODIS, adquirida desde la plataforma TERRA, el 26 de Octubre de 2003, con una resolución espacial de 500 m, sobre el estado de California, Estados Unidos.

En ella, se muestran los incendios activos y las plumas de humo que se extienden sobre la zona costera, propagándose hacia el Oeste, por el Océano Pacífico. La costa californiana es una región frecuentemente afectada por el fenómeno de los incendios. Las condiciones meteorológicas y el tipo de vegetación de la zona crean, en ocasiones, condiciones muy favorables para que se desencadenen grandes incendios que ocasionan graves pérdidas ecológicas pero también en infraestructuras e incluso en vidas humanas. Una oleada de incendios forestales afectó al estado de California (Estados Unidos) el 25 de Octubre de 2003. Alimentados por los vientos cálidos y secos de Santa Ana, que soplan hacia la costa desde las zonas desérticas del interior, los incendios forestales arrasaron ese día más de 4.000 hectáreas en tan sólo 6 horas.

De Noroeste a Sureste, a lo largo de la costa, se encuentran, en primer lugar, los incendios Piru, Verdale y Simi Incident. Avanzando hacia el sur, al este de la ciudad de Los Angeles, los incendios Grand Prix, al oeste, y Old, al este. A continuación, se ven los incendios Roblar 2, Paradise y el gran Cedar, cuya densa nube de humo obscurece por completo la ciudad costera de San Diego. Este incendio afectó a una superficie de más de 100.000 ha, siendo el incendio más grande registrado en la historia de California. Finalmente, en la frontera entre California y México, el incendio Otay. Al menos 13 personas perdieron la vida en estos incendios. Miles de personas fueron evacuadas y cientos de casas fueron destruidas. De acuerdo a las investigaciones realizadas por los agentes forestales, parte de los incendios fueron causados por descuidos pero otros fueron provocados de forma intencionada.

Fuente: http://svs.gsfc.nasa.gov/stories/fires_california_20031027/



de la cobertura vegetal puede considerarse prácticamente irreversible.

4. En el agua

Los incendios forestales contribuyen, en gran medida, a la alteración del ciclo del agua, tanto a escala local como regional y global. El agua de lluvia que alcanza la corteza terrestre tiene básicamente cuatro caminos a seguir: infiltración, transpiración, evaporación y escorrentía. El porcentaje de agua que toma un camino u otro depende de la fisiografía del terreno, el tipo de suelo y, sobre todo, de la cubierta vegetal. En zonas desprovistas de vegetación, como las áreas afectadas por un incendio, disminuye notablemente la captación del agua de lluvia, incrementándose la escorrentía superficial. Cuando la cantidad de agua que escurre es muy elevada y, especialmente, si la velocidad es alta, comienza el proceso erosivo. Desde el punto de vista del aprovechamiento racional del agua, cuanto menor es la infiltración y mayor la escorrentía, peor es el aprovechamiento de los recursos hídricos. Además, se ha podido comprobar que los incendios forestales tienen una clara influencia en las avenidas.

Además de alterar el ciclo hidrológico, los incendios tienen efectos sobre la contaminación de las aguas. En los suelos quemados las aguas de las precipitaciones drenan rápidamente, puesto que no son interceptadas por la vegetación, y llegan rápidamente a los cauces. Estas aguas tendrán una mayor turbidez por las partículas o cenizas que se erosionaron del suelo por lo que se pueden derivar problemas en la calidad de las aguas por el material en suspensión que transportan y también por el aumento del material sedimentado en los cauces de los ríos y embalses.

5. En la fauna

La fauna se ve afectada por los incendios, bien de un modo directo, en el mismo momento en que se producen, por efecto del fuego, del calor o por asfixia; o bien indirectamente como consecuencia de la destrucción del ecosistema. Lógicamente, la fauna más afectada es aquella con menor movilidad y, en general, la aérea más que la subterránea pues los efectos del incendio suelen profundizar poco en el suelo, sobre todo si la propagación es rápida.

6. En el paisaje

Después de un incendio, la pérdida del valor ecológico de la zona, la disminución de la vida silvestre, la ausencia de sus sonidos y colores característicos, pueden disminuir el valor científico, cultural o didáctico de un área. Además, el aspecto de desolación que ofrece un monte quemado aleja a visitantes y excursionistas en detrimento de la función recreativa del monte.

A las pérdidas económicas y los daños ambientales que los incendios ocasionan, y que acabamos de enumerar, hay que añadir la amenaza que representan para la vida humana como lo demuestran las víctimas que cada año se producen en el mundo.

No obstante, es conveniente anotar, de nuevo, que estos efectos negativos están directamente asociados con la intensidad y el ciclo de recurrencia del fuego, puesto que su acción en períodos naturales también resulta muy beneficiosa para el ecosistema, en la medida en que aporta nutrientes al suelo y acelera la mineralización, permite la regeneración de los individuos añejos y facilita la dispersión de frutos y semillas, su germinación y floración.

El fuego ha sido históricamente utilizado como una herramienta para la gestión de uso de la tierra y muchos ecosistemas se adaptan bien a los ciclos de incendios. Sin embargo, los cambios recientes en el clima y en los factores sociales relacionados con el uso del fuego (abandono de las prácticas rurales tradicionales, aumento de los usos recreativos, etc) han contribuido a aumentar sus efectos negativos a escala local y global.

Aunque no existen datos suficientemente fiables, dada la escasez de fuentes estadísticas en este ámbito, se calcula que, en el año 2000, unos 350 millones de hectáreas fueron afectadas por los incendios forestales en el mundo. Si bien los incendios forestales se concentran principalmente en algunas zonas del mundo y durante períodos específicos de tiempo, el hecho de que puedan aparecen en casi todas partes y o durante períodos de tiempo inusuales hace obligatorio un enfoque global para su evaluación. Algunos programas internacionales, tales como el de Observación Global de la Cobertura Forestal (GOFC) y la misión mundial de la FAO de los recursos del programa de evaluación forestal (FRA 2000), destacan la necesidad de proporcionar, a la comunidad mundial, información fiable para describir y comprender la situación de los bosques del mundo en relación con el fenómeno de los incendios.

Los incendios forestales son la amenaza más importante para los bosques y superficies forestales en el sur de Europa. Las estadísticas más recientes de los países más afectados (Francia, Grecia, Italia, Portugal y España) muestran que, entre los años 2000 y 2006, más de 450.000 hectáreas anuales, de promedio, fueron afectadas por este fenómeno. En 2007, fue aún peor, especialmente en Grecia e Italia, donde la superficie total quemada fue de 500.000 ha. En España, las estadísticas, elaboradas por los organismos regionales encargados de la lucha contra incendios y compiladas por el MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino), indican que se producen unos 20.000 incendios forestales cada año con una superficie forestal media anual afectada de unas 123.000 hectáreas (período 1996-2005). La incidencia de este fenómeno en nuestro país se relaciona con las características climatológicas propias de la región mediterránea con períodos estivales de altas temperaturas y escasas precipitaciones, pero también con la acción del hombre, ya que, según las estadísticas oficiales, el 80 % de los incendios ocurridos en España en el período 1996-2005 se debieron a causas humanas. En las últimas décadas, se ha venido observando un aumento en la frecuencia de incendios que ha agravado sus efectos negativos, tanto desde el punto de vista ambiental como económico y social. ¿A qué se debe este aumento de frecuencia de los incendios? El fenómeno de los incendios es muy complejo por lo que la respuesta a esta pregunta no es sencilla. Algunos investigadores apuntan hacia la existencia de factores de tipo climático, relacionados con el calentamiento global, aunque no existen evidencias concluyentes al respecto. Sí son más evidentes los factores de tipo socioeconómico. Según los expertos, los factores condicionantes de esta situación en el conjunto de los países del arco norte del Mediterráneo son ecológicos (grandes períodos de sequía con alta inflamabilidad de la vegetación), económicos (baja renta del sector forestal), demográficos (éxodo rural) y políticos (atención de lo urgente –extinción- y no de lo importante –prevención-).

Es evidente que, para poder llevar a cabo unas adecuadas labores de prevención, es necesario conocer las causas de los incendios forestales. Las estadísticas de incendio forestal que se recogen en España desde 1968 (Partes de Incendios Forestales), muestran que la actividad humana causa, de forma directa o indirecta, más del 80% de los incendios que se producen en nuestro país. Las estadísticas para el período 1996-2005 muestran que la mayor parte de estos incendios fueron intencionados (60,4%). Las motivaciones de los incendios intencionados se desconocen en más de un 50%. Sin embargo, de aquellos incendios intencionados en los que sí se tiene un conocimiento cierto de su origen, son las quemas agrícolas ilegales (42,96%) y las quemas para regeneración de pastos (30,86%) las que ocupan los primeros lugares en las estadísticas oficiales. El resto de motivaciones conocidas (pirómanos, modificación de usos del suelo, etc.) no alcanzan, en ningún caso, el 15%.

Para establecer relaciones fiables causa-efecto entre los incendios forestales y el complejo conjunto de factores que afectan al cambio global, es preciso contar con información precisa y con suficiente perspectiva temporal sobre la incidencia de este fenómeno a escala planetaria. La teledetección ha demostrado ser la técnica idónea para obtener esta información gracias a que proporciona datos de la superficie terrestre con una cobertura, espacial y temporal, adecuada.

Como ya se ha visto, la teledetección se ha convertido, en los últimos años, en una herramienta casi imprescindible para la planificación y gestión territorial a diversas escalas. Un ejemplo de especial relevancia, por su repercusión ambiental y social, es la gestión de riesgos naturales (inundaciones, terremotos, incendios, etc...). Diversos equipos de investigación, a nivel nacional e internacional, trabajan actualmente en el desarrollo de métodos que permitan la predicción, gestión y cartografía de riesgos naturales a partir de la teledetección espacial. El objetivo es ofrecer información rápida y precisa que permita evitar o atenuar los efectos sobre la población, las infraestructuras y el medioambiente. En principio, todos los riesgos naturales son susceptibles de ser analizados a partir de la teledetección ya sea en la fase de prevención, en la gestión

Figura 186: Imagen, en falso color, obtenida por el sensor ETM+, a bordo del satélite Landsat 7, el 21 julio de 2002 sobre los incendios Rodeo y Chediski, Arizona, Estados Unidos

En Julio de 2002 los incendios Rodeo y Chediski afectaron de forma simultánea a la zona centro-este del estado de Arizona. La imagen muestra la zona arrasada por el fuego en tonos rojos y la vegetación no afectada en verde. Se pueden observar las plumas de humo (en tonos azulados) procedentes de los frentes activos en ambos incendios: el Rodeo (a la derecha de la imagen) que comenzó el 18 de Julio de 2002 y el Chediski (a la izquierda de la imagen) que comenzó el 20 de julio del mismo año. Ambos incendios se propagaron hasta converger en un único evento que se convirtió en el mayor incendio de la historia de Arizona.

Los dos incendios destruyeron un total de 463.000 acres (unas 187.000 ha) de las que más de la mitad pertenecían a la reserva india de Fort Apache. Cuatrocientas casas fueron destruidas y unas 30.000 personas tuvieron que ser evacuadas. Las fuerzas de extinción llegaron a contar con más de 6.000 efectivos procedentes de distintas agencias nacionales y estatales. Se necesitaron 3 semanas para controlar los incendios. El coste total de las labores de extinción fue de unos 32 millones de dólares; es decir, aproximadamente 2 millones de dólares al día.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=2936



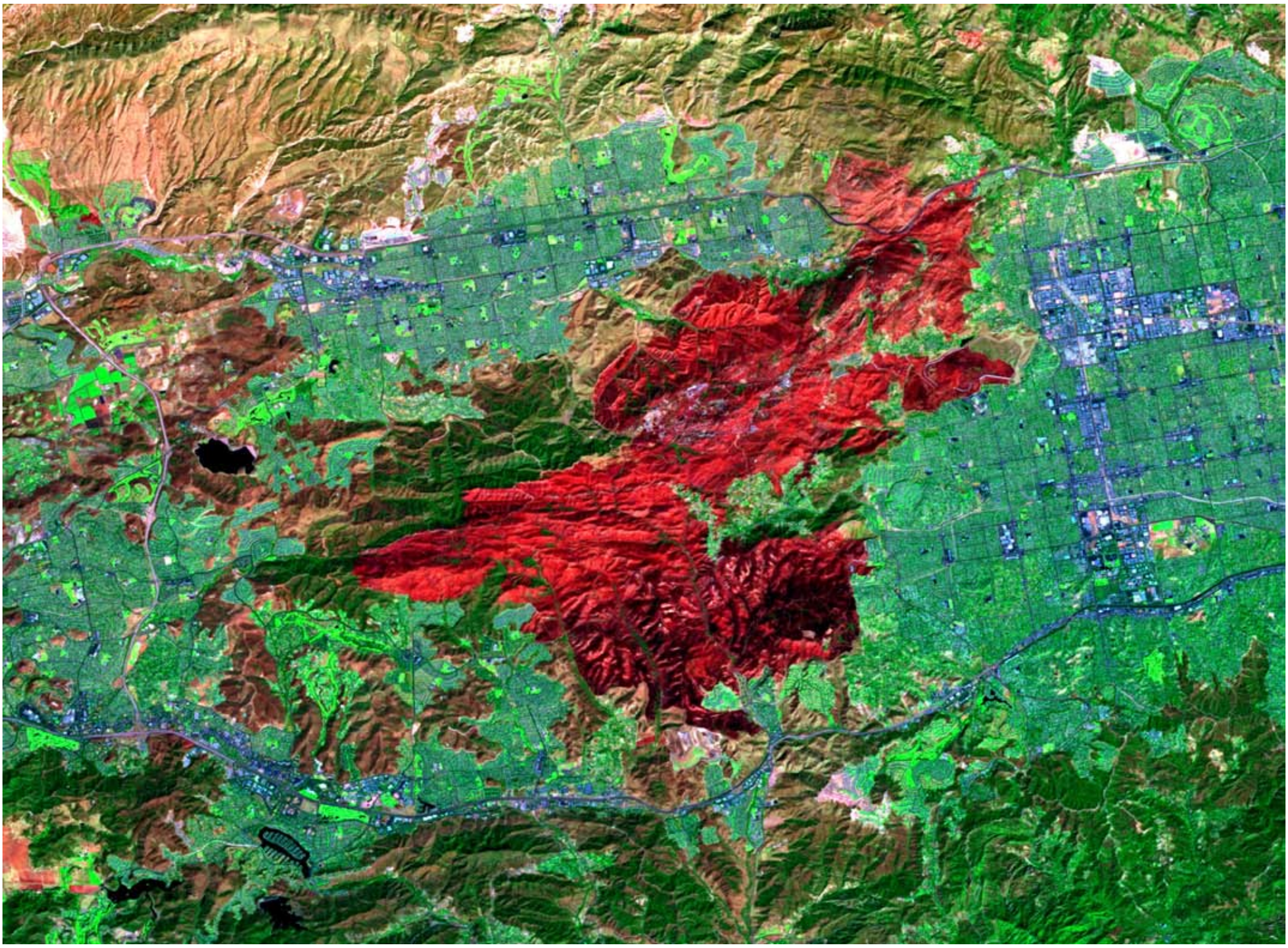




Figura 187: Imagen ASTER adquirida, desde la plataforma espacial TERRA, el 6 de octubre de 2005 sobre el incendio de Topanga, al noroeste de Los Angeles, Califonia.

Los sensores de resolución espacial media-alta como es el caso del sensor Aster, permiten realizar un estudio detallado de las consecuencias de los incendios y proporcionan información de gran interés, no sólo en lo que se refiere a la cuantificación del área quemada, sino también respecto a la severidad del incendio y su efecto sobre la vegetación. Esta información puede ser utilizada para mejorar la gestión del territorio y planificar, adecuadamente, la recuperación de la zona afectada por el fuego.

La imagen es una composición en color en la que la zona afectada por el incendio aparece destacada en tonos rojos intensos. En ella se observa cómo la zona forestal afectada por el fuego se encuentra completamente rodeada de urbanizaciones (tonos azules en la imagen), lo que evidencia el riesgo sobre la población que los incendios tienen en estas zonas de la costa oeste de Estados Unidos donde las casas se encuentran con frecuencia en contacto directo con extensas áreas forestales. A pesar de ello, en el incendio de Topanga sólo resultaron destruidas 3 casas y algunos almacenes. Esto fue posible gracias a las labores de protección y prevención efectuadas en la zona por los organismos responsables y que permitieron salvar propiedades con un valor estimado de varios billones de dólares.

Fuente: http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery-detail.asp?name=topanga

de la crisis o la evaluación y recuperación de las zonas afectadas. La gran diversidad de sensores (aeroportados y espaciales), actualmente disponibles, y el amplio rango de características espectrales, espaciales y temporales que presentan ofrecen una amplia gama de fuentes de información útiles al gestor.

En el ámbito de los incendios forestales, la cartografía del número, localización y área afectada resulta especialmente útil de cara a disponer de información suficiente para realizar un análisis apropiado de la distribución espacial de este fenómeno. Este tipo de análisis permite extraer conclusiones acerca del grado de actividad de cada una de las variables que en él intervienen, además de mostrar la sensibilidad al fuego que presentan las diferentes regiones. En este aspecto, la teledetección constituye una inestimable fuente de información de cara a la prevención (localización de medios en áreas de fuerte incidencia histórica, validación de modelos de riesgo, etc.), y a la gestión de las áreas afectadas por incendios, con el propósito de conseguir una adecuada recuperación de las mismas. La posibilidad que ofrece la teledetección para obtener esta información en tiempo “casi real” facilita, además, las labores de evaluación de daños de cara a determinar rápidamente las zonas con mayor vulnerabilidad potencial post-incendio, priorizando las tareas de defensa y recuperación que permitan minimizar las pérdidas ambientales y las consecuencias sociales que de ellas puedan derivase.

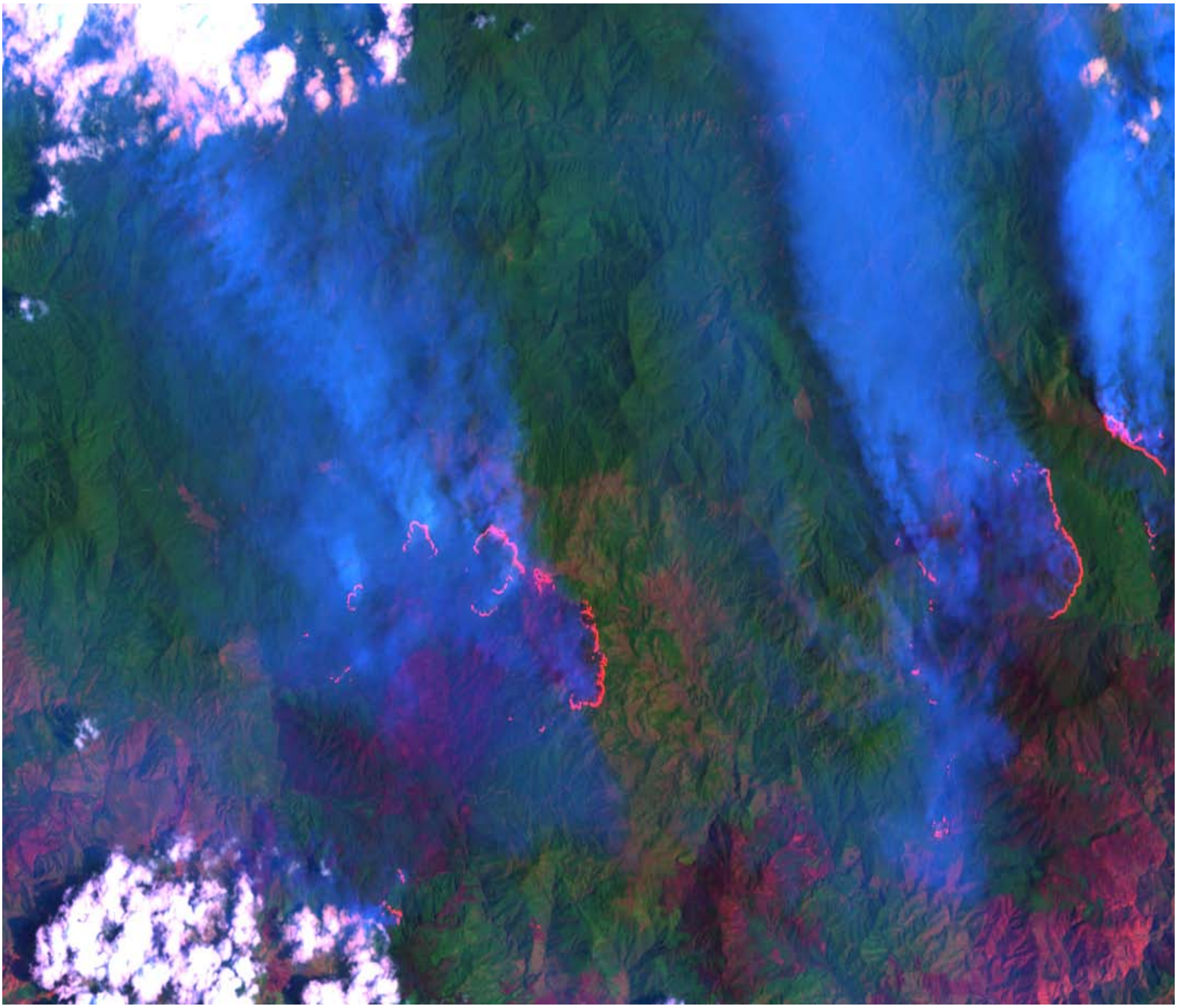


Figura 188: Imagen ETM+ adquirida, desde el satélite Landsat 7, el 21 de marzo de 2005 sobre la Cordillera Central, República Dominicana.

En marzo de 2005 dos grandes incendios afectaron a esta zona montañosa de la isla La Española, actual territorio de la República Dominicana, situada en el archipiélago de las Antillas Mayores. El fuego se inició en el Parque Nacional José del Carmen Ariza situado al pie del Pico Duarte, la montaña más alta de la República Dominicana. El gobierno tuvo que solicitar aviones de extinción de incendios a los Estados Unidos para poder controlar el avance del fuego.

Los incendios llevaban activos más de una semana cuando fue registrada esta imagen. Es una composición en color en la que se pueden apreciar claramente los frentes activos en tonos rojos/anaranjados. Una densa nube de humo procedente de los focos activos cubre de tonos azulados la mayor parte de la imagen. El fuego consumió una amplia zona de bosque nativo (tonos verdes intensos en la imagen), provocando graves pérdidas ecológicas. En esta zona la vegetación desempeña un papel muy importante en el suministro de agua, particularmente durante la estación seca que va de diciembre a mayo, ya que permite retener el agua de las nubes. Los 17 ríos del país nacen en la Cordillera Central y son utilizados para el abastecimiento de agua potable y de riego así como para producir energía.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=14775





Figura 189: Imagen MODIS adquirida, a bordo de la plataforma espacial AQUA, el 7 de febrero de 2009 sobre el estado de Victoria, Australia.

Este día casi 400 incendios ardieron, de forma simultánea, en el estado australiano de Victoria causando la mayor pérdida de vidas humanas registrada en el país como consecuencia de los incendios forestales. Murieron 173 personas y 414 resultaron heridas por lo que ese día pasó a conocerse como el "sábado negro". La mayor parte de los incendios se iniciaron y propagaron en un día en el que se registraron las condiciones meteorológicas más desfavorables, con temperaturas superiores a 40 grados centígrados y vientos de más de 100 kilómetros por hora que cambiaron de dirección a lo largo del día reavivando los flancos de los incendios que se convirtieron en enormes frentes de llamas que ardían a una elevada velocidad, arrasando ciudades que, tan sólo unas horas antes, habían escapado del fuego.

Los incendios destruyeron más de 2.029 casas y dañaron miles más. Muchas ciudades al noreste de Melbourne, la capital del estado, fueron destruidas casi por completo. Los fuegos afectaron a 78 municipios y provocaron el desplazamiento de unas 7.562 personas. La imagen muestra varias plumas de humo procedentes de los incendios activos. El color grisáceo y la forma alargada de las plumas de humo permiten diferenciarlas, en la imagen, de la cubierta nubosa que presenta un tono más blanco y formas redondeadas. El humo de los incendios se propagó cruzando el Mar de Tasmania y llegó, incluso, a Nueva Zelanda.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=36976





Figura 190: Imagen MODIS adquirida, a bordo de la plataforma espacial TERRA, el 26 de agosto de 2007.

La cuenca mediterránea Europea es una zona especialmente afectada por el fenómeno de los incendios debido a sus características climáticas y a la influencia de factores antropogénicos que incrementan el riesgo y que se relacionan fundamentalmente con el abandono de zonas rurales y el aumento del uso turístico de las zonas forestales. Grecia es, junto con España, Italia, sur de Francia y Portugal, uno de los países con mayor incidencia de este fenómeno, con episodios extremos especialmente dramáticos como el que se produjo en el año 2007. En el verano de ese año, una gran oleada de incendios arrasó el país causando la muerte de, al menos, 60 personas y la destrucción de cientos de casas. El gobierno griego declaró el estado de emergencia nacional para poder hacer frente a la situación y tuvo que solicitar ayuda internacional para poder controlar los incendios. Bomberos de más de 20 países colaboraron en las labores de extinción.

Los focos activos aparecen resaltados en la imagen en color rojo. Se observa, claramente, una línea de fuego que se extiende a lo largo de la costa occidental de la península del Peloponeso. Hacia el noreste, un gran incendio proyecta una enorme nube de humo sobre la ciudad de Atenas. En la imagen se observa cómo el humo procedente de los focos activos cruza el Mediterráneo con dirección suroeste y llega a las costas de Libia.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=7996



Figura 191: Imagen adquirida por el sensor MERIS, a bordo de la plataforma espacial europea Envisat, el 9 de agosto de 2006 sobre Galicia, España.

En los primeros días de agosto de 2006 una oleada de incendios arrasó Galicia generando una situación de crisis que demandaba información rápida y precisa sobre el desarrollo del fenómeno, de cara a una evaluación inmediata de los daños ocasionados. Este periodo de intensa ocurrencia estuvo precedido por una situación meteorológica muy desfavorable, con fuerte sequía acumulada que coincidió con vientos del noreste que soplaban en la región desde finales de julio y que se intensificaron a partir del 4 de agosto. Esta situación de meteorología adversa estuvo acompañada de una intensa actividad incendiaria, con la aparición de cientos de focos de fuego cada día.

En estas condiciones, el dispositivo de extinción fue insuficiente ya que por cada incendio que se controlaba o extinguía surgían varios nuevos incendios en otros puntos. La situación comenzó a mejorar el 10 de agosto y finalizó con la llegada de un frente atlántico el día 15 de agosto que aportó precipitaciones en todo el noroeste peninsular. La teledetección contribuyó a facilitar información de gran utilidad para la evaluación y seguimiento del fenómeno. En la imagen se pueden observar claramente las plumas de humo que se extienden hacia el Atlántico procedente de los focos activos. Los incendios se localizaron, fundamentalmente, en las provincias del litoral atlántico, Coruña y Pontevedra, que superaron el 90% de toda la superficie afectada por los incendios. La mayor parte de la superficie quemada correspondió a incendios grandes que superaron las 1.000 hectáreas.

Fuente: http://www.esa.int/esaEO/SEMMDJY7QQE_index_0.html



6.4. DESECACIÓN DE MASAS DE AGUA Y DE ZONAS HÚMEDAS

Como ya es sabido, la distribución espacial de los climas en el mundo obedece a factores zonales y azonales o geográficos. Los primeros configuran una distribución de los climas en grandes franjas desde el Ecuador hasta los Polos mientras que los segundos alteran ligeramente esta distribución zonal por la influencia de diversos factores geográficos, entre los cuales podemos citar las corrientes frías o la altitud.

En la zona de climas áridos, esteparios y desérticos, se localizan algunas masas de agua, de grandes dimensiones, que están sufriendo, desde hace unas décadas, un fenómeno progresivo de desecación que podría llegar a ser irreversible. Al situarse en zonas de transición, entre los climas tropicales lluviosos y los climas húmedos mesotérmicos, son especialmente vulnerables debido a factores naturales relacionados con la variabilidad climática y con el cambio climático. Por otra parte, se encuentran muy afectados por la presión demográfica operada sobre su medio geográfico en las últimas décadas.

Para ilustrar este fenómeno, vamos a poner dos ejemplos que son paradigmáticos: la desecación del Lago Chad y del Mar de Aral, situados ambos en zonas de climas áridos, el primero en el Sahel y el segundo entre los desiertos y estepas asiáticas. Existen otros muchos casos. Algunos ya los hemos comentado en otros capítulos como la sobreexplotación del acuífero subterráneo de La Mancha Occidental y su influencia sobre la desecación del humedal de Las Tablas de Daimiel (págs. 116-117).

El lago Chad

Está situado en la franja árida del Sahel, en el centro-norte de África. Geopolíticamente, su superficie es compartida por cuatro países: Nigeria, Níger, Chad y Camerún. Todos ellos forman parte de la Comisión de la Cuenca del Lago Chad (LCBC), ya que una parte de sus territorios pertenecen a la cuenca hidrográfica del lago. Se trata de un lago endorreico con escasa profundidad (7 m. en su punto de mayor profundidad). En 1963, ocupaba una superficie de 26.000 km^2. En base a observaciones desde las plataformas espaciales tripuladas Gemini y Apollo 7, se estimó que, en 1968, el lago cubría una superficie de 22.000 km^2 (Mohler *et al*. 1989; Lulla *et al*. 1991). En 2001, se calculó que inundaba una superficie de 1.500 km^2 . Sin embargo, en la actualidad, la superficie inundada es casi 1/30 de la que ocupaba hace 47 años. En 2006 cubría una extensión de 900 km^2.

En su día, fue considerado como uno de las mayores cuerpos de agua dulce del mundo. A comienzos de los años sesenta, estaba catalogado como el 4º lago más grande de África. Sin embargo, una serie de procesos naturales y antrópicos se han combinado, ocasionando una drástica reducción de su lámina de agua. Se calcula que las demandas de agua para el regadío se han cuadruplicado en el periodo comprendido entre 1983 y 1994. Se estima que la producción pesquera ha descendido un 60%. Además, están descritos otros impactos ambientales como la degradación de los pastizales, una reducción del ganado y de la biodiversidad, una transferencia de contaminantes hacia las capas inferiores de los suelos y la salinización de éstos.

Se ha acometido un programa de investigación, en el que se han implicado equipos multidisciplinares, para estudiar los factores hidrológicos, climáticos y antrópicos que originan las variaciones de las reservas hídricas del lago. Se trata de comprender las relaciones entre el clima, los recursos de agua y sus usos. Los investigadores trabajan en modelos hidrológicos y climáticos que ayuden a comprender las causas del problema y a encontrar soluciones para el futuro de este ecosistema.

Entre los principales factores que han causado la desecación del 96% de la superficie original del lago hay que señalar la variabilidad climática, el cambio climático y la presión demográfica.

El impacto del cambio climático se ha hecho notar, de forma especial, en esta zona vulnerable, de transición al desierto. Las recurrentes sequías de los años sesenta, setenta y ochenta han ocasionado una reducción considerable de las precipitaciones y, en consecuencia, de los aportes hídricos superficiales, así como un incremento de las pérdidas por evaporación.

Por otra parte, se ha incrementado la demanda de agua para la puesta en regadío de amplias superficies de cultivos en la cuenca del lago. El caudal de las dos principales fuentes que alimentan el lago, los ríos Chari y Logone, ha disminuido de forma significativa en los últimos 40 años. Según previsiones de la NASA, si el agua sigue retrocediendo a este ritmo, el Lago Chad podría desaparecer en unos veinte años. Por ese motivo, la Comisión de la Cuenca del Lago Chad y la FAO están buscando soluciones que corrijan o mitiguen este desastre ambiental. Se pretende trabajar en tres líneas de acción. En primer lugar, implantando nuevos modelos de gestión del agua más sostenibles, de forma que se tengan en cuenta las técnicas agrícolas tradicionales. En segundo lugar, limitando o reduciendo las demandas de agua para regadíos. Por último, estudiando la viabilidad de proyectos de ingeniería que pretenden el trasvase de agua desde el río Oubangui, principal afluente del Congo, hasta el río Chari. De esta manera, a pesar del coste económico y ambiental del proyecto, se podría acometer el llenado del lago, la mitigación de este problema ambiental y socioeconómico, que afecta a una población de 30 millones de personas, y la recuperación de este valioso ecosistema.

El mar de Aral

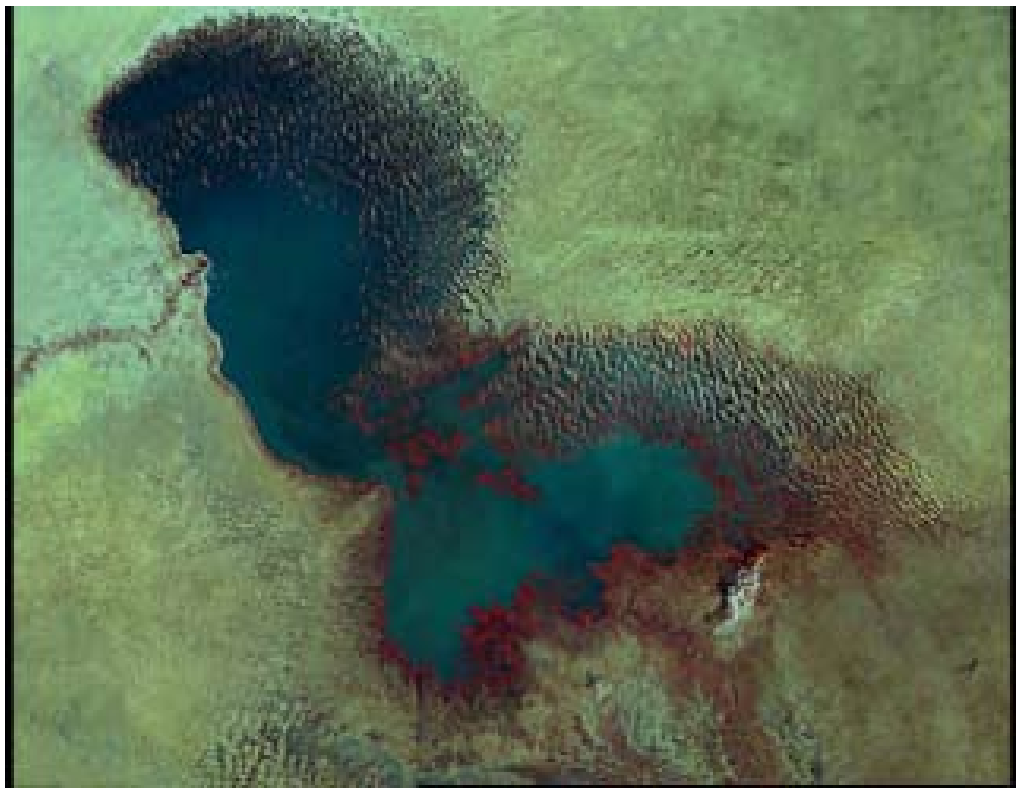
Es otro de los paradigmas de la desecación de grandes masas de agua como consecuencia de la interacción de factores naturales y humanos. Se trata de un gran lago endorreico, o mar interior, situado sobre una gran depresión entre los desiertos y estepas de Asia Central. Los ríos Amu Daria y Sir Daria confluyen en el Mar de Aral, siendo sus principales tributarios. La parte septentrional del mar se encuentra en territorio de Kazajistán, mientras que la parte meridional pertenece a Uzbekistán. En 1960, ocupaba una superficie de 68.000 km² y contenía un volumen de 1.100 km³ de agua. Entonces, era considerado el cuarto lago del mundo en extensión.

Desde 1930, se construyó una densa red de canales de riego desde los ríos tributarios del mar de Aral. Su calidad no ha alcanzado un estándar adecuado por lo que las pérdidas de agua, por infiltración, han alcanzado, en algunos casos, el 70% del volumen de agua transportado. Una mínima parte de la red se encuentra impermeabilizada.

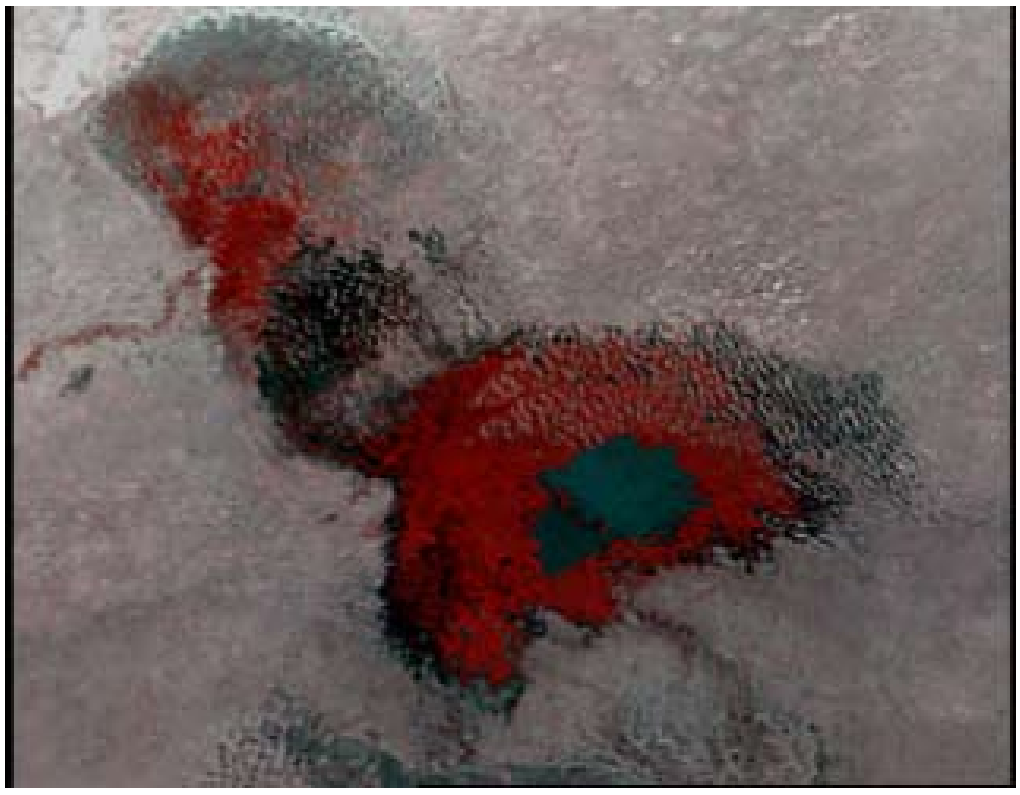
En la década de los años 60, la Unión Soviética decidió derivar agua de los ríos Amu Daria y Sir Daria para poner en regadío grandes extensiones de tierras ubicadas en los desiertos de Uzbekistán y Kazajistán. Se comenzó a producir, principalmente, algodón, junto a otros cultivos que demandan grandes dotaciones anuales de agua, como son el arroz, los melones y algunos cultivos herbáceos. En la actualidad, Uzbekistán es uno de los mayores productores mundiales de algodón. Se estima que, antes de 1960, se utilizaban entre 20 y 50 km³ de agua. En la década de los años sesenta, el nivel del mar de Aral descendió una media de 20 cm/año, mientras que en los años setenta esta media se incrementó a 55 cm/año y hasta 85 cm/año en la década de los ochenta. A pesar de las evidentes señales de alarma, el volumen de agua trasvasada para el regadío continuó en aumento.

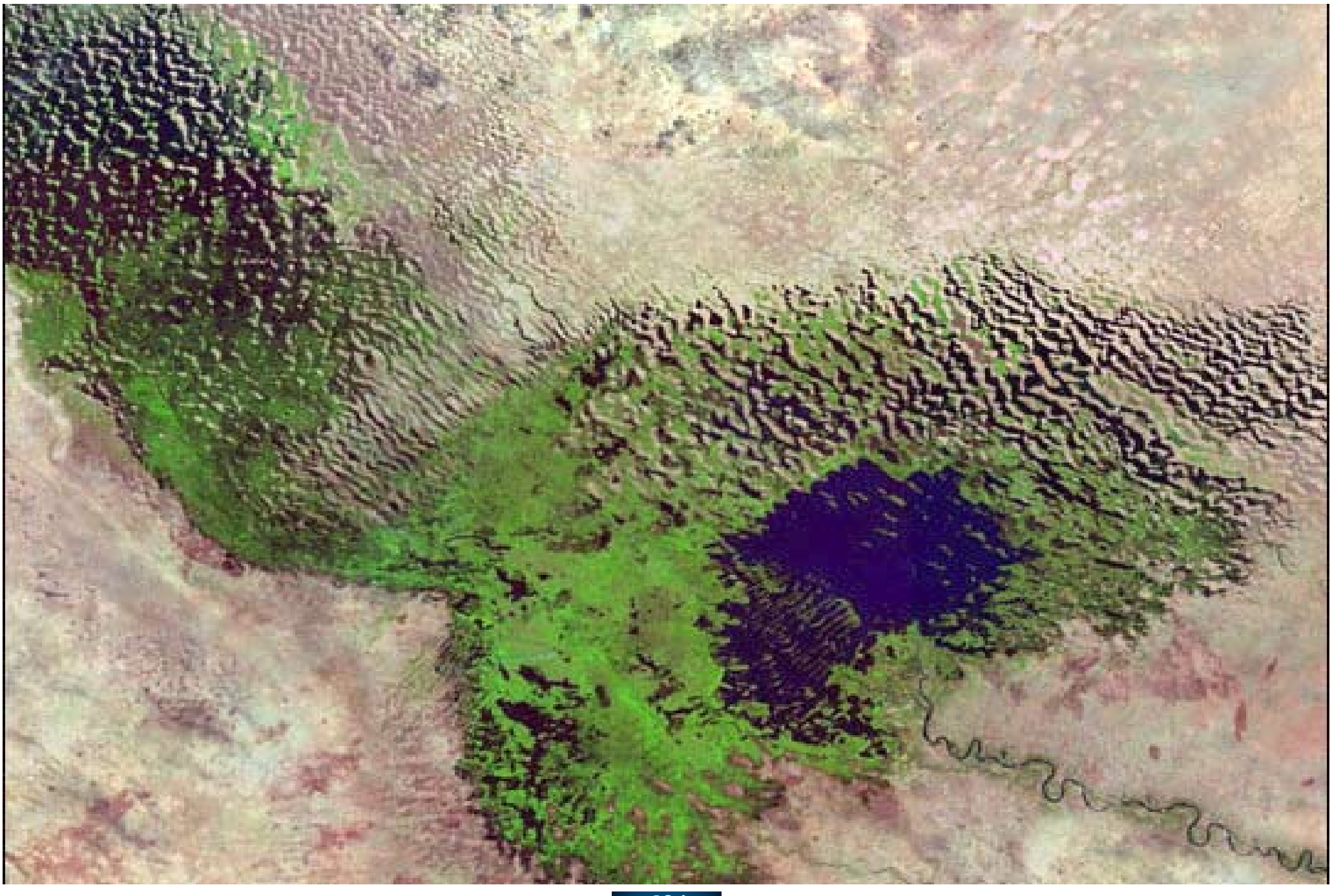
Como consecuencia de la intensidad de los trasvases, la superficie del mar se ha ido reduciendo, de forma progresiva y preocupante. En 1987, el mar quedó dividido en dos conjuntos, el mar de Aral Norte y el mar de Aral Sur. Se construyó, sin éxito, un canal artificial para conectar ambas partes. En 1998, la superficie ocupada por el mar de Aral había descendido hasta 28.687 km², siendo considerado, en ese momento, el 8º lago más grande del mundo. En menos de 40 años, se ha perdido un 58% de superficie inundada, a un ritmo medio anual del 1,5%. La reducción del volumen de la lámina de agua, ha ocasionado otro impacto ambiental. En aguas menos profundas se favorece la evaporación del agua, de manera que la salinidad del mar ha aumentado desde cifras próximas a 10 g/l hasta 45 g/l.











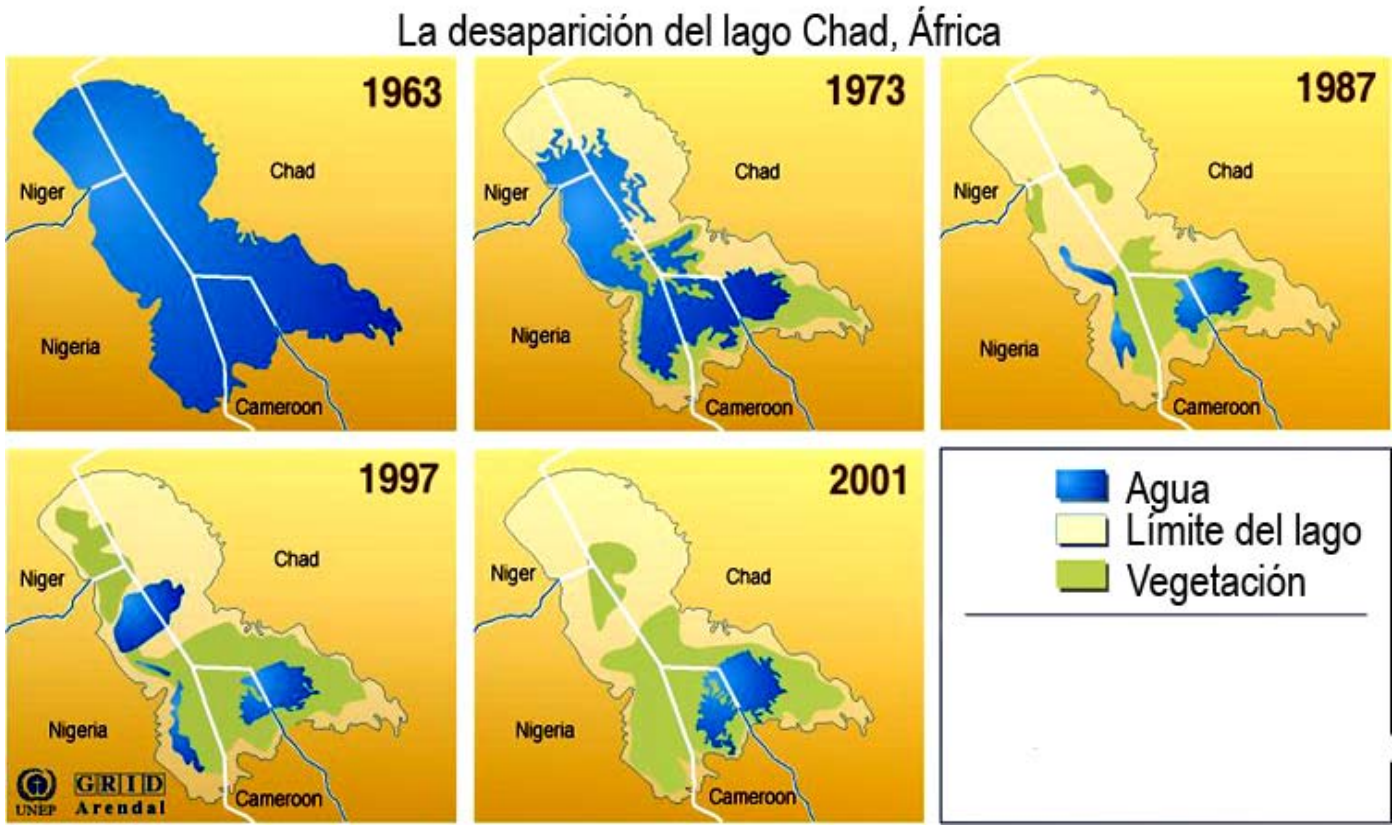


Figura 192 (izquierda, en página anterior): Mosaico de imágenes, captadas desde plataformas espaciales, sobre el lago Chad. Muestran la evolución temporal de la lámina de agua. En octubre de 1963, (arriba a la izquierda, vista del lago, en blanco y negro, desde el satélite Argón) el agua, en color negro, inundaba toda la cubeta. El resto de las imágenes del mosaico han sido adquiridas por el satélite Landsat en distintas fechas: enero de 1973 (arriba a la derecha), enero de 1987 (centro a la izquierda), enero de 1997 (centro a la derecha). La imagen inferior es un compuesto de imágenes Landsat adquiridas entre noviembre de 2000 y febrero de 2001. En negro o azul oscuro y textura fina se aprecia la superficie inundada. En color rojo (en las imágenes de 1973, 1987 y 1997) y en verde (imagen inferior) se observa la vegetación palustre que rodea a la lámina de agua, desarrollada en el lecho del lago. Las ondas, que se aprecian al este y norte del lago, son dunas formadas por el viento. En la secuencia de imágenes se evidencia la preocupante reducción de la superficie inundada.

Fuente: NASA GSFC Scientific Visualization Studio y Landsat 7 Project Science Office.

Figura 193 (arriba): Mapa evolutivo de la situación ambiental del lago Chad, en África, entre 1963 y 2001. El lector puede apreciar la paulatina reducción de la superficie inundada y la progresiva extensión de la vegetación palustre sobre el lecho del lago.

Fuente: United Nations Environment Program
http://www.gsfc.nasa.gov/gsfc/earth/environ/lakechad/chad.htm



Para mitigar este problema ambiental, se han acometido distintos proyectos de restauración focalizados en la parte septentrional del mar. En 2003, con apoyo del Banco Mundial, el Gobierno de Kazajistán construyó el dique Kokaral, una presa para separar las dos mitades del mar de Aral. El objetivo que se pretendía alcanzar era que los aportes hídricos del Sir-Daria, que lleguan al mar, por el norte, pudiesen rellenar la mitad septentrional y reducir los niveles de salinidad. Parece que ese objetivo se ha alcanzado.

Sin embargo, por razones económicas, no es viable acometer proyectos similares en la zona meridional del mar. En esta mitad, los procesos de desecación y de salinización siguen su curso. En 2003, se estima que la profundidad del mar de Aral meridional ha descendido 3,5 m. respecto a la registrada a comienzos de los años noventa.

Por otra parte, el agua tiene una salinidad 2,4 veces mayor que la del océano. Las aguas más profundas tienen mayor salinidad que las superficiales, dificultando los flujos verticales del agua. Las aguas superficiales, recalentadas en verano, se evaporan más rápidamente de lo habitual, reduciendo la lámina de agua e incrementando las costras salinas.

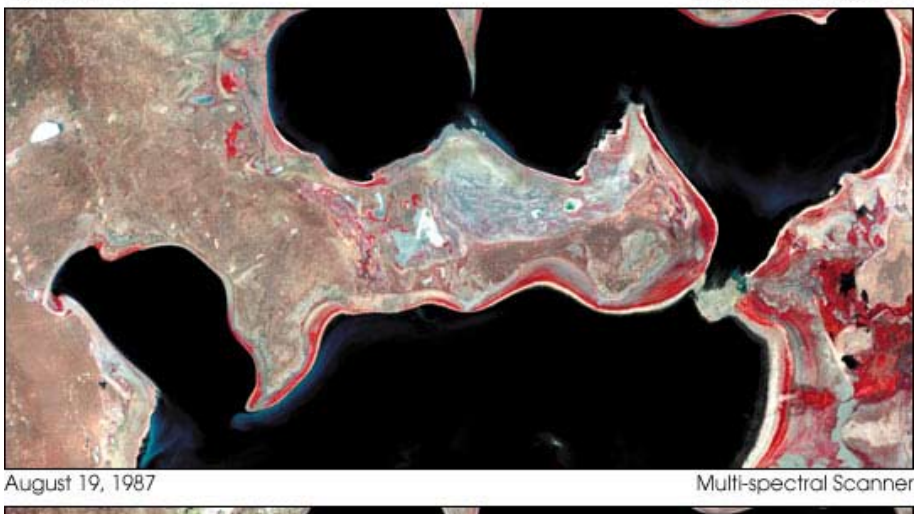
Según las últimas predicciones, se espera que la parte occidental del mar de Aral Sur podría desaparecer en un plazo de 15 años. Se están estudiando diferentes propuestas para mitigar los problemas ocasionados por la desecación del mar de Aral. Éstas tienen diversos grados de viabilidad y costes económicos. Repasamos, brevemente, algunas de estas propuestas. Las tres primeras están orientadas a reducir la demanda de agua. La última se focaliza en el contexto de proveer, desde las administraciones, más agua a los usuarios aunque ésta haya que trasvasarla desde lugares remotos y el coste, económico y ambiental, de la medida no se justifique.

1. Introducción de cánones por el uso del agua de los ríos, de manera que los agricultores paguen, de forma proporcional, por el agua que consumen.
2. Introducción de variedades alternativas de algodón, más adaptadas a la zona y cuyo cultivo demande menores dotaciones anuales de agua.
3. Mejora de la calidad de los canales de regadío, con objeto de impermeabilizarlos y de reducir las pérdidas de agua por fugas.
4. Trasvase de agua de los glaciares de Siberia para reemplazar el agua perdida en el Aral.

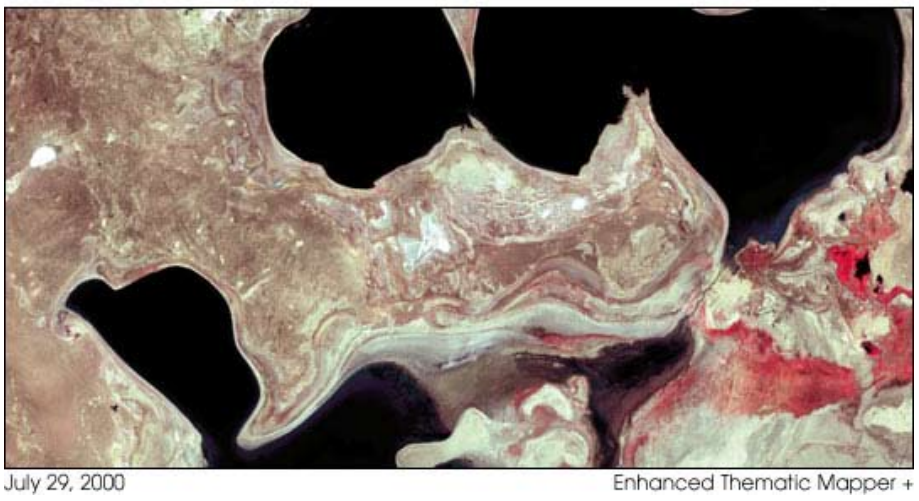
En resumen, tanto el lago Chad como el mar de Aral se encuentran en una situación, realmente, comprometida.



May 29, 1973 Multi-spectral Scanner



August 19, 1987 Multi-spectral Scanner



July 29, 2000 Enhanced Thematic Mapper +

Figura 194 (arriba): Secuencia de imágenes Landsat que muestran la reducción de la lámina de agua en el sector norte del mar de Aral (Kazajstán). La imagen superior fue registrada el 29 de mayo de 1973 por el radiómetro multiespectral MSS. En color negro se observa la masa de agua. Aún se encontraba inundado el estrecho que une el lóbulo septentrional con el meridional. En la costa este, todavía se aprecian, en color negro sobre la tierra emergida, las lagunas que el río Sir-Daria forma en su desembocadura. Este río es el único tributario del mar de Aral norte.

En la imagen central, adquirida por Landsat-MSS el 19 de agosto de 1987, se han reducido las lagunas de la desembocadura del Sir-Daria, como consecuencia del aprovechamiento intensivo de sus aguas para la agricultura de regadío. Este descenso de aportes hídricos al mar ha provocado la disminución de la superficie marina. El estrecho se ha cerrado y la delgada y alargada península que dividía el mar en dos lóbulos, en esta fecha es más grande. Las tierras emergidas ganan terreno al mar. En el sector norte del mar aparece un nuevo y fino apéndice en dirección norte-sur.

En la imagen inferior, adquirida el 29 de julio de 2000 por el sensor ETM+, el estrecho se ha cerrado completamente, la península es aún más extensa y, en el sector meridional del mar, emergen nuevas islas. El Sir-Daria no aporta, apenas, caudales al mar.

Fuente: USGS Eros Data Center Satellite Systems Branch.

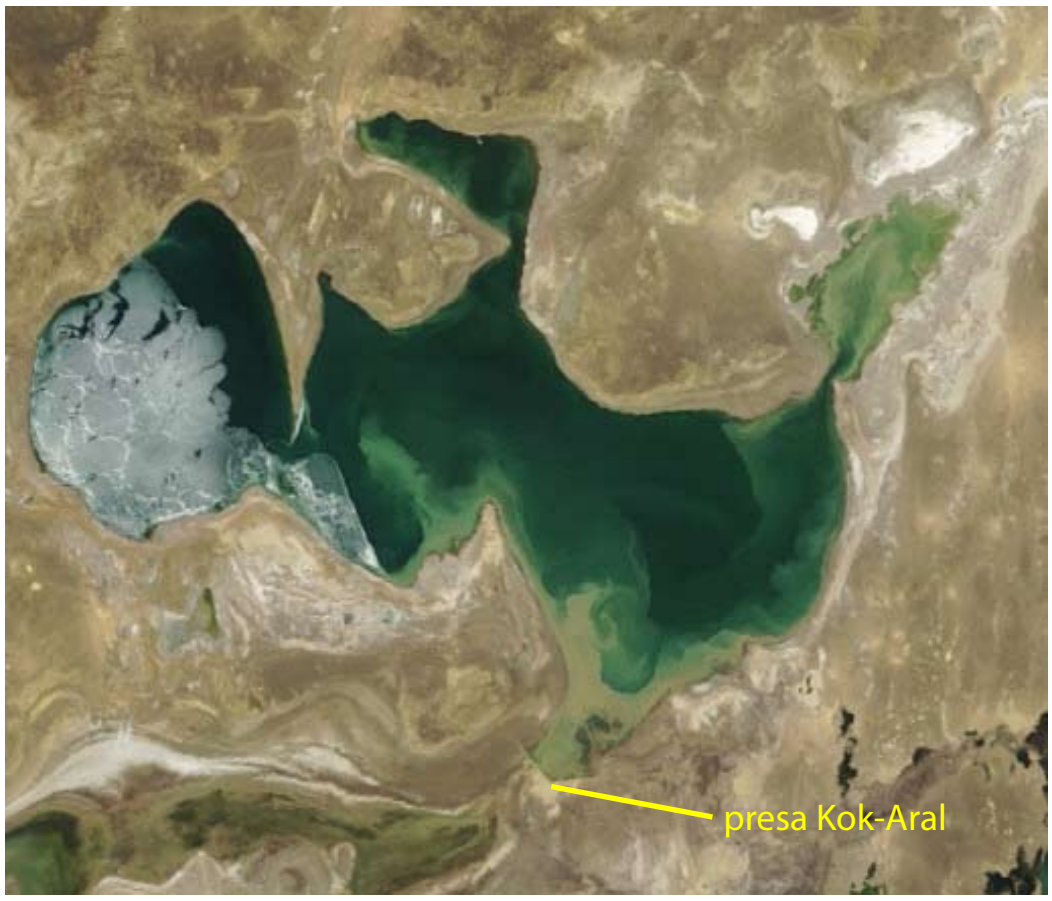


Figura 195: Imagen adquirida, por el sensor MODIS, a bordo del satélite TERRA, el 9 de abril de 2006. Gracias a la presa Kok-Aral, construida en el estrecho con ayuda financiera del Banco Mundial, se empieza a retener, en el sector septentrional del mar, el escaso caudal aportado por el Sir-Daria. De esta manera, comienza a rellenarse con agua dulce este sector de la cuenca marina. El lóbulo noreste está expandiéndose progresivamente y el apéndice puntiagudo de tierra emergida, localizado en la parte centro-occidental, vuelve a reducirse al aumentar el nivel de las aguas del mar.

Cortesía de Jesse Allen, Earth Observatory. Datos de Goddard Earth Sciences DAAC.





Figura 196: Conjunto de imágenes que muestran la evolución espacio-temporal del mar de Aral. A la izquierda se incluye un compuesto de imágenes, adquiridas entre los meses de julio y agosto de 1989. A la derecha, se adjunta una imagen MODIS, captada el 5 de octubre de 2008, que muestra el estado actual del mar de Aral.

Un examen comparativo entre ambas imágenes ilustra, claramente, el continuado proceso de desecación de esta gran masa de agua. A pesar de las evidencias de este impactante proceso, en 1989 aún se conservaba una extensa lámina de agua. La isla Vozrozhdeniya, más conocida como isla Renacimiento, en el suroeste del mar, y la isla Kelmes, en el centro de la imagen de 1989, aún están rodeadas por agua.

En 2008, la extensión del mar se ha reducido drásticamente, especialmente en el sector meridional. Las islas han desaparecido. Ahora están rodeadas de tierras emergidas. En el centro del lecho marino se observa una gran mancha blanca que se corresponde con grandes depósitos de sal, generados por la evaporación del agua marina.

Al norte, la presa de Kok-Aral, construida sobre el estrecho, ha aislado el sector norte del mar, consiguiendo el objetivo de conservación y llenado del mismo con las aguas de su tributario, el río Sir-Daria.

Fuentes: http://earthobservatory.nasa.gov/images/imagerecords/3000/3730/aral_sea_1989_250m.jpg
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Aral_Sea_05_October_2008.jpg

6.5. EUTROFIZACIÓN DE MASAS DE AGUA

Cuando una masa de agua es pobre en nutrientes (oligotrófica) tiene las aguas muy transparentes, la luz penetra bien, el crecimiento de las algas es pequeño, existe poca materia orgánica en el fondo y mantiene muchas especies de seres vivos pero en poca cantidad (Álvarez Cobelas *et al*., 1991). Las plantas y animales que habitan estos ecosistemas son los característicos de aguas bien oxigenadas. Su presencia es un bioindicador de la buena calidad de las aguas.

Sin embargo, en ocasiones se produce un proceso de eutrofización de las masas de agua. En otras palabras, se producen un incremento de sustancias nutritivas en las aguas, lo que provoca un exceso de fitoplancton. Habitualmente, se designan eutrofos a los ecosistemas caracterizados por una abundancia de nutrientes.

Las causas de la eutrofización son naturales y humanas, aunque son más importantes las segundas debido a su intensidad y a la velocidad del proceso. Las fuentes más importantes de eutrofización son:

1. La contaminación atmosférica: los óxidos de nitrógeno y de azufre reaccionan con el agua atmosférica formando nitratos y sulfatos. Una vez que se depositan estos elementos en los suelos pueden formar sales solubles que son arrastradas a las aguas subterráneas y superficiales (ríos, embalses, lagos y mares, donde desembocan los primeros).
2. La contaminación agropecuaria, sobre todo la contaminación difusa de los suelos y de los acuíferos provocada por los fertilizantes utilizados en la producción agraria y por los excrementos animales generados por las explotaciones ganaderas. Estas actividades aportan importantes cantidades de nitrógeno y fósforo.
3. La contaminación forestal que se produce cuando se abandonan, en los ríos, residuos forestales derivados del aprovechamiento maderero. Este fenómeno aumenta la materia orgánica disuelta en las masas de agua.
4. La contaminación urbana. Las aguas residuales vertidas desde los núcleos urbanos aportan residuos orgánicos e inorgánicos, como el fosfato, empleado en la fabricación de detergentes. En torno al 19% de la composición de éstos son sales de fósforo. A pesar de la existencia de estaciones depuradoras de aguas residuales, distribuidas a lo largo de la red fluvial española, éstas no son capaces de depurar completamente las aguas. Se estima que, en conjunto, estas infraestructuras sólo son capaces de filtrar el 60% del fósforo que llega a las aguas continentales españolas. Por ese motivo, y dado que el fósforo es el elemento clave del proceso de eutrofización de las masas de agua, la legislación ambiental promueve la reducción o sustitución del fosfato en la fabricación de detergentes.

Así pues, la eutrofización produce, de manera general, un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la biodiversidad. Biológicamente, existen pocas especies de seres vivos aunque sus poblaciones son muy abundantes.

Las algas crecen y se multiplican rápidamente produciendo una explosión de algas, conocida con el nombre anglosajón de *bloom*. La proliferación de algas incrementa la turbidez y reduce la transparencia del agua. Las aguas eutróficas poseen escasa calidad para el abastecimiento humano y para la realización de actividades deportivas.

Por otra parte, la densidad de algas dificulta la penetración de la luz hasta el fondo del ecosistema acuático. Por consiguiente, en el fondo se hace difícil la fotosíntesis, obstaculizando la producción de oxígeno. Se observa una distribución desigual del oxígeno, abundante en las capas superficiales y casi inexistente en las demás capas. En las zonas profundas, las bacterias se encargan de descomponer las algas y organismos muertos, consumiendo el escaso oxígeno disponible. En este ambiente de anoxia, es imposible la presencia de especies de peces que necesitan aguas ricas en oxígeno. Asimismo, los cambios ocurridos en estas masas de agua imposibilitan la presencia de las especies que, tradicionalmente, habitaban estos ecosistemas antes de la perturbación de sus características físico-químicas.

En las masas de agua eutróficas se acumula mucha materia orgánica en el fondo y aquéllas se rellenan de sedimentos, reduciéndose su profundidad.

En los océanos, la eutrofización provoca, en ocasiones, una marea roja o marea blanca, es decir la explosión demográfica de una sola especie de alga que puede ocasionar trastornos en la cadena trófica.

Para determinar el nivel de eutrofización de una masa de agua se miden varios parámetros biofísicos, de forma complementaria: el contenido de clorofila-a en el agua, como medida de la biomasa de fitoplancton, la carga externa e interna de fósforo y de nitrógeno y el valor de penetración de la luz en la masa de agua.

Cargas totales de nutrientes (en gr/m/año) en lagos y embalses

Profundidad (m)	Tolerable		Peligroso	
	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)
5	1,0	0,07	2	0,14
10	1,5	0,10	3	0,20
50	4,0	0,25	8	0,50
100	6,0	0,40	12	0,80
150	7,5	0,50	15	1,00
200	9,0	0,60	18	1,20

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 2000, p. 348.

La eutrofización es un proceso que se desarrolla de forma muy rápida. Se estima que afecta al 54% de los lagos asiáticos, al 53% de los lagos europeos, al 48% de los norteamericanos, al 41% de los sudamericanos y al 28% de los lagos africanos.

En España, según Álvarez Cobelas *et al*., (1991), la eutrofización afecta, principalmente, a las cuencas hidrográficas del Júcar, Tajo y del Pirineo Oriental. Por el contrario, las menos eutrofizadas son las cuencas del Sur, del Segura y del Duero. Las comunidades autónomas con mayor grado de eutrofia en sus aguas continentales son las de Madrid y País Vasco. Existe una correlación estadísticamente significativa entre el volumen de población de cada cuenca hidrográfica y la concentración de fósforo reactivo soluble en sus aguas. Las aguas continentales más eutróficas son, por orden de afección, las de las acequias, ríos, lagos y embalses.

En algunas publicaciones se recomiendan algunas medidas para evitar o, al menos, mitigar este proceso. Debido a que se trata de un problema complejo, no existe una única solución. A pesar de ello, la lucha contra la eutrofización debería focalizarse, principalmente, en las medidas preventivas, reduciendo los vertidos de contaminantes que contienen altas concentraciones de fosfatos y nitratos y en programas de educación y concienciación ambiental con objeto de emplear los recursos de forma adecuada. Señalamos, a continuación, algunas medidas recomendadas, frecuentemente, para luchar contra la eutrofización:

1. Empleo de menor cantidad de detergentes o de detergentes que contengan menos fosfatos.
2. Uso agrícola más eficiente de los fertilizantes, de forma que se evite el exceso de abonado y su transporte hacia las masas de agua.
3. Almacenamiento adecuadado del estiércol que se usa en agricultura.
4. Introducción de buenas prácticas agrarias en las explotaciones para reducir la erosión de las tierras, evitando que lleguen más sedimentos, sales y otros elementos contaminantes a las corrientes de agua.
5. Sustitución de algunas prácticas de cultivo por otras menos contaminantes.
6. Mejora de las infraestructuras ambientales. En concreto, conviene mejorar la capacidad de las estaciones depuradoras de aguas residuales con objeto de que incluyan tratamientos biológicos y químicos que eliminen, principalmente, el fósforo y el nitrógeno.

Figura 197: Imagen SeaWiFS adquirida el 13 de junio de 2000. En la parte inferior de la imagen se observa el tercio oriental del mar Mediterráneo. En la mitad superior de la imagen se identifican el mar Negro y sus mares colindantes, Azov, al norte y Mármara, entre los mares Negro y Mediterráneo.

Obsérvese la diferencia de color de las aguas del Mediterráneo y del mar Negro. Mientras que las aguas más claras del Mediterráneo se aprecian en color azul medio-oscuro, las aguas eutrofizadas del mar Negro se visualizan en color azul-verdoso claro, como consecuencia de la turbidez ocasionada por la alta concentración de fitoplancton. Al ser un mar profundo, las aguas superficiales, más oxigenadas, no se mezclan con las profundas. En zonas profundas existe poco oxígeno, favoreciendo la floración de algas. En el sureste del Mediterráneo, en el delta del Nilo, también se advierte una mancha litoral de color azul-verdoso. La cantidad de sedimentos aportados por el río y las elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo, ocasionadas por la contaminación urbana de las tres metrópolis del delta y por la contaminación agraria, son responsables del color con el que se perciben estas aguas desde el espacio.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov



Figura 198: Imagen SeaWiFS, adquirida el 22 de marzo de 2001, sobre el golfo de California. Como puede verse, el golfo es alargado y estrecho y se encuentra enmarcado, geográficamente, por la península de Baja California, al oeste, y por la provincia mexicana de Sonora, al este. También en esta zona se concentra el fitoplancton, evidenciado, en la imagen, por su color verdoso que afecta tanto al interior del golfo como a las aguas litorales del oeste de la península californiana.

La distribución espacial del fitoplancton, en forma de remolinos, indica la naturaleza turbulenta de las corrientes marinas de la rama subtropical del Océano Pacífico. Las manchas blancas que cubren el océano son nubes.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?7638



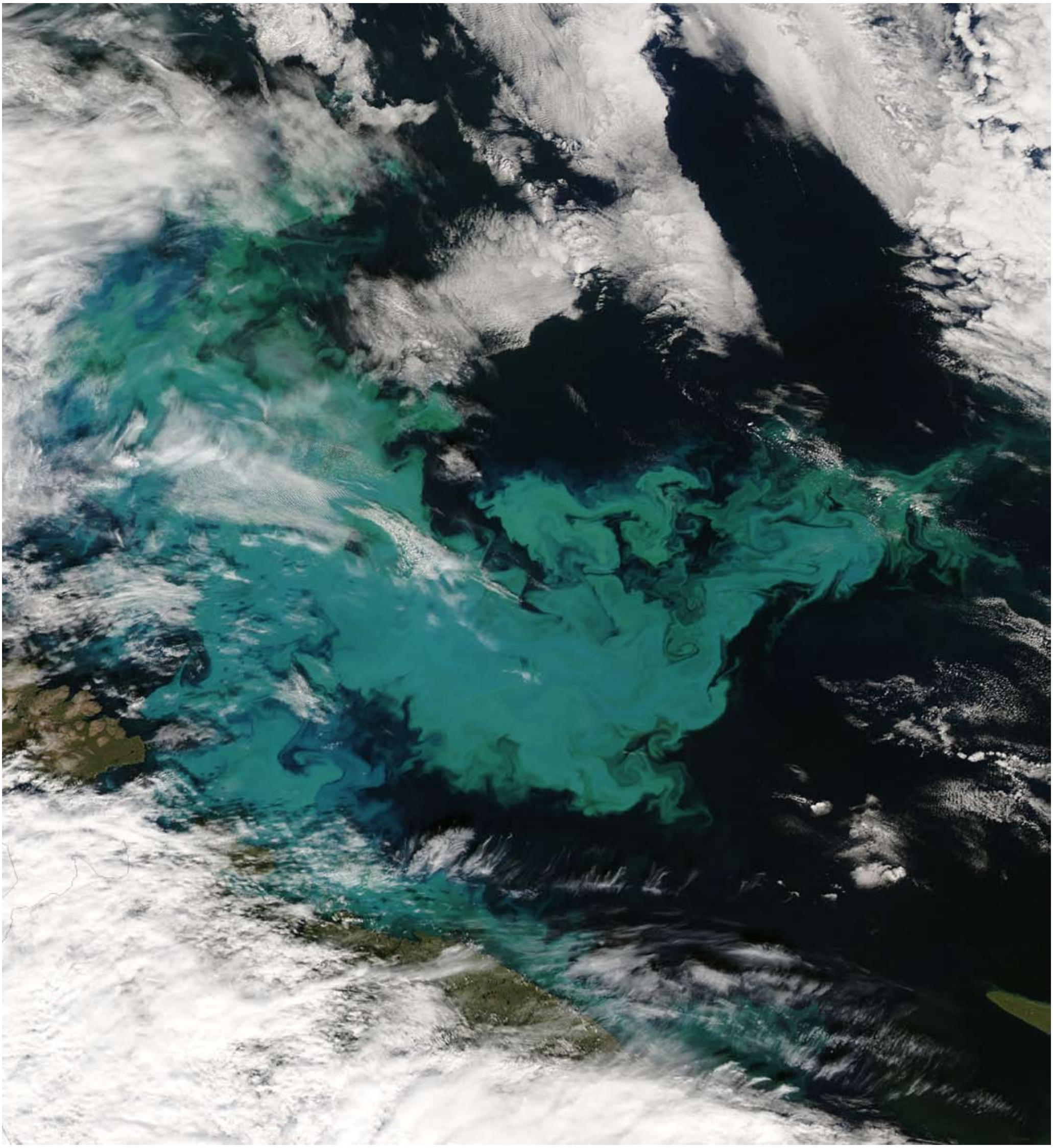




Figura 199: Imagen MODIS, captada por el satélite AQUA el 12 de agosto de 2008 sobre la costa noreste de Noruega, en el mar de Barents.

Entre las nubes, se observa la extensa mancha de fitoplancton que se muestra en un intenso color verde esmeralda. En estas aguas frías del norte de Europa, durante el invierno, las algas y plantas tienen dificultad para captar la luz solar para realizar la fotosíntesis, debido a la oblicuidad de los rayos solares y al reducido número de horas de luz solar. Sin embargo, durante el verano, la mejoría de las condiciones ambientales produce una explosión en el crecimiento y concentración de algas, tal como se ilustra en esta imagen.

Cortesía de NASA de Jeff Schmaltz. MODIS Rapid Response Team.



Figura 200: Fotografía en color natural, captada por los astronautas de la NASA, sobre el Lago de Valencia, Venezuela. Se trata de un lago localizado sobre una fosa tectónica, rodeada por dos bloques levantados, la Cordillera de la Costa, al norte, y la Serranía del Interior, al sur. En la imagen se observan ambas cordilleras como unas franjas rugosas, de textura gruesa y colores verdosos y ocres. El lago ocupa una cuenca endorreica. Se estima que, actualmente, inunda una superficie de 344 km^2.

A pesar de que, en tiempos, se temió por el lago como consecuencia de las abundantes extracciones hídricas, en la actualidad el nivel de sus aguas se ha incrementado como consecuencia del trasvase de aguas desde la cuenca del Orinoco.

Al noreste de la imagen se observa la ciudad de Maracay. Las aguas residuales de este núcleo urbano y de otros vecinos son vertidas, sin ningún tratamiento biofísico eficaz, al lago de manera que su lámina de agua se encuentra, realmente, amenazada. En la masa de agua lacustre se aprecia el impacto de la eutrofización. Los colores verdosos del lago ilustran la abundante presencia de algas que han explosionado. La escasa calidad de las aguas dificulta la potenciación de las actividades recreativas y turísticas en el lago.

Fuente: NASA.



Figura 201: Imagen adquirida, por el sensor hiperespectral MODIS, a bordo del satélite TERRA, el 13 de enero de 2008 sobre las islas Malvinas, en el Atlántico Sur.

La concentración de fitoplancton es visible en esta imagen. Estos organismos reflejan la luz y forman remolinos de color azul y verde que bordean las islas Malvinas a lo largo de su fachada oriental y de la occidental, entre este archipiélago y la costa sureste de Sudamérica. Estas manchas de fitoplancton están asociadas a una rama de la corriente fría circumpolar antártica, muy rica en nutrientes. A su vez, estos organismos son la base de la existencia de una rica diversidad biológica en la zona.

Adicionalmente, el fitoplancton juega un papel clave en el ciclo global del carbono. Cuando estas concentraciones se encuentran en la superficie marina absorben una gran cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera. Tras realizar el proceso de fotosíntesis, el CO_2 se transforma en carbohidratos. Cuando el fitoplancton o los animales que lo han ingerido mueren, el carbono es transportado hacia el fondo oceánico.

Cortesía de Jeff Schmaltz, MODIS Land Rapid Response Team, NASA GSFC.



6.6. EL PROCESO DE URBANIZACIÓN EN EL MUNDO. MODELOS DE CIUDADES

Según los datos del Population Reference Bureau (PRB, 2009), en 2009 la población mundial alcanza una cifra de 6.809.972.000 habitantes, registrando un incremento anual del 1,1% sobre el año anterior. En 2009, China (1.331 millones de habitantes), India (1.171 millones de hab.) y Estados Unidos (307 millones de hab.) son los tres países más habitados del planeta. De acuerdo con algunas proyecciones demográficas, se espera que, en 2050, la población mundial se incremente hasta 9.202.458.484 habitantes, lo que supondría un crecimiento medio anual del 0,85%.

En términos generales, se entiende por tasa de urbanización, la proporción de población que vive en ciudades, es decir de población urbana, respecto al total de población de un territorio determinado, ya sea un contienente, país o región. Se expresa en modo de porcentaje.

A nivel mundial, la urbanización es un proceso que experimenta una progresión creciente. En 1800 sólo el 2% de la población mundial vivía en ciudades (Boyle, 2004). En 1950, el 29,1% de la población mundial vivía en núcleos urbanos. Sin embargo, según un informe del Fondo de Población de Naciones Unidas (UNFPA), en 2008 la población urbana ha superado, por primera vez en la historia, a la población rural, al situarse, ligeramente, por encima del 50%.

AÑOS	POBLACIÓN URBANA (HAB)	%	POBLACIÓN RURAL (HAB)
1950	732.729.000	29,1	1.785.900.000
1955	852.068.000	30,9	1.903.755.000
1960	992.753.000	32,9	2.028.721.000
1965	1.157.987.000	34,7	2.176.887.000
1970	1.329.548.000	36,0	2.362.944.000
1975	1.516.326.000	37,3	2.551.782.000
1980	1.736.844.000	39,2	2.697.838.000
1985	1.984.517.000	41,1	2.846.461.000
1990	2.273.241.000	43,2	2.990.352.000
1995	2.556.862.000	45,1	3.117.518.000
2000	2.856.927.000	47,1	3.213.654.000
2005	3.171.990.000	49,2	3.281.638.000
2008	3.300.000.000	50,5	3.234.653.000
2030	5.000.000.000	61,0	3.196.721.311

Fuente: Naciones Unidas.

Las tasas de urbanización no son similares espacialmente ni se han producido a la vez, temporalmente. Desde la Revolución Industrial, el proceso de urbanización fue más intenso en los países europeos y norteamericanos. Actualmente, se suelen diferenciar tres grandes conjuntos socioeconómicos que se encuentran en distintos estadios de urbanización: el mundo más desarrollado tiene una tasa de urbanización del 75%, el mundo en desarrollo alcanza una tasa del 44% y el mundo menos desarrollado registra una tasa de urbanización que apenas llega al 27%.

En el primer bloque, buena parte de los países del occidente y norte de Europa poseen tasas de urbanización superiores al 75%. Bélgica, por ejemplo, se anota una tasa del 97%. En otros países, el porcentaje de población urbana es el siguiente: Suecia (84%), Noruega (80%), Reino Unido (80%), Francia (77%) y España (77%).

Un nivel similar poseen los países desarrollados extraeuropeos, como Estados Unidos (79%), Canadá (81%), Japón (86%), Corea del Sur (82%), Nueva Zelanda (86%), Australia (83%), Qatar (100%), Arabia Saudí (81%), Kuwait (98%), Rusia (73%), Argentina (91%) y algunos países emergentes como Brasil (84%). En los más extensos, la mayor parte de la población se concentra en las ciudades, dejando grandes espacios de sus territorios vacíos.

En el grupo de países en desarrollo, extraemos algunos ejemplos. En ellos, la proporción de población que vive en ciudades es la siguiente: Nicaragua (58%), Honduras (49%), Bolivia (65%), Paraguay (57%), Marruecos (56%), Argelia (63%) y Egipto (43%).

Como contraste, buena parte de los países menos desarrollados de África poseen tasas de urbanización inferiores al 30%. Entre otros ejemplos, pueden citarse los casos de Burundi (10%), Uganda (13%), Burkina Faso (16%), Etiopía (16%), Malawi (17%), Níger (17%), Ruanda (18%), Eritrea (21%), Chad (27%) y Guinea-Bissau (30%). Se puede decir que, desde hace unas décadas, la urbanización se produce con más intensidad y, sobre todo, más aceleradamente, en los países emergentes y en vías de desarrollo.

Como después se verá, con más detalle, en las siguientes figuras, las ciudades y las grandes aglomeraciones urbanas no se distribuyen homogéneamente por la superficie terrestre. Lógicamente, se rehuyen los espacios que geográficamente presentan algún factor de rechazo tales como bajas temperaturas, extrema aridez, concentración de riesgos naturales. Por el contrario, existe una preferencia por los territorios templados de latitudes medias así como una tendencia a ocupar los espacios litorales frente a los del interior. En estas zonas es donde se concentra la población urbana.

Los expertos de Naciones Unidas apuestan por un modelo de desarrollo en el que las ciudades sean protagonistas. Afirman que en ellas, la población dispone de más oportunidades.

A nivel mundial, la producción se concentra en las grandes ciudades, las provincias avanzadas y las naciones ricas. La mitad de lo que se produce en el mundo cabe en el 1,5% de la superficie del planeta. América del Norte, la Unión Europea y Japón —cuyas poblaciones no llegan al 15% de la población mundial— concentran las tres cuartas partes de la riqueza del mundo (Banco Mundial, 2008).

A pesar de estas desigualdades geográficas, los colectivos más vulnerables como el de las mujeres y niños encuentran mayores oportunidades de promoción en las ciudades, disminuyendo así la desigualdad. Las ciudades ofrecen más puestos de trabajo y en ellas hay más servicios y equipamientos para satisfacer las necesidades básicas de la población y la esperanza de vida es mayor. Algunas publicaciones citan como ejemplo a Bangkok. A pesar de que concentra tan sólo el 12% de la población total de Tailandia, aporta el 38% del producto interno bruto del país. Igualmente, se pone como ejemplo a El Cairo, que aunque ocupa apenas el 0,5% de la superficie de Egipto, produce más de la mitad de su PIB (Banco Mundial, 2008).

La urbanización es citada, en los informes del Banco Mundial, como uno de los principales factores de desarrollo de los países junto a las migraciones y a la intensificación del comercio de productos especializados. Se afirma que ningún país ha conseguido un nivel de desarrollo adecuado sin haber alcanzado antes un cierto nivel de industrialización y de urbanización. La carrera hacia la multiplicación de las ciudades en los países en desarrollo es, en cierta medida, caótica pero se cree que es necesaria, como ha ocurrido, previamente, en otros países ahora desarrollados.

A pesar de los beneficios de la urbanización en términos de desarrollo, queda un reto pendiente por alcanzar: la mitigación de la pobreza. Según datos de Naciones Unidas, al menos 1.000 millones de personas habitan en algún barrio pobre de alguna ciudad en el mundo. La pobreza podría aumentar más porque en los barrios pobres suele haber un crecimiento vegetativo mayor que en otras zonas de las ciudades.

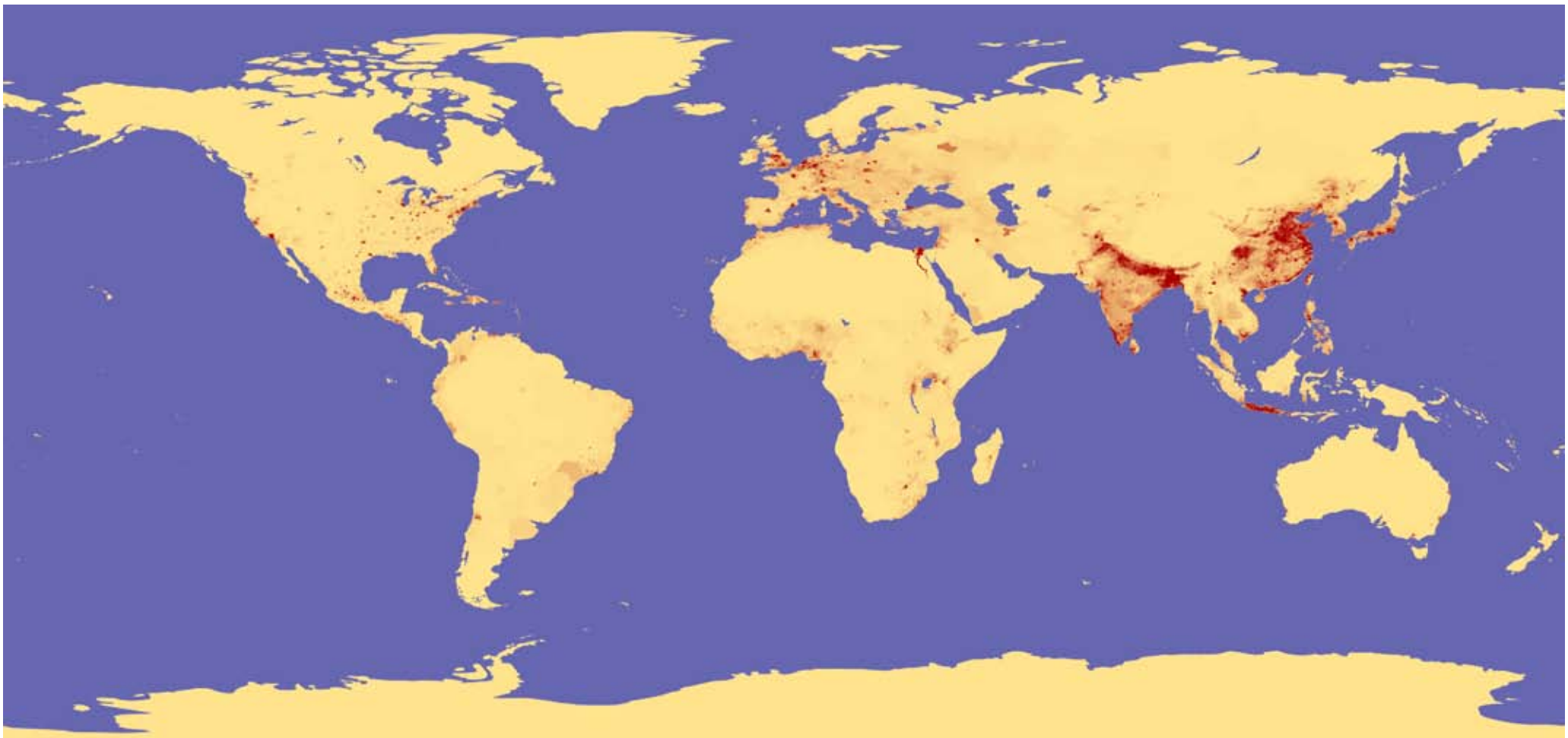


Figura 202: Mapa de densidad de población en el mundo, expresado en habitantes por kilómetro cuadrado, en 1994. La escala cromática oscila entre los tonos amarillos (menores densidades) a los ocres y rojos (densidades más altas).

A pesar de la antigüedad de esta fuente documental, se muestra la desigual distribución de la población en el mundo. Se percibe una evidente dualidad entre los anekúmenes, o espacios despoblados, y los ekúmenes, zonas ocupadas por el hombre. Tras la lectura cartográfica de esta figura se constata la concentración de la población en las zonas más favorables desde el punto de vista geográfico. Lógicamente, los grandes desiertos de África, Asia y Australia, las zonas polares del Ártico y de la Antártida y las extensas selvas ecuatoriales y tropicales tienen densidades de población muy escasas. Por el contrario, las zonas subtropicales y templadas, especialmente las del hemisferio norte, albergan los mayores volúmenes de población. La costa este de Norteamérica, Europa, India, China y el sureste asiático son las zonas más densamente pobladas del mundo. En ellas se concentran la mayor parte de las aglomeraciones urbanas bajo las formas de grandes ciudades, áreas metropolitanas o conurbaciones que forman un denso tejido urbano continuo.

Las oportunidades de desarrollo socioeconómico que se encuentran en las áreas urbanas las hacen más actractivas de manera que se intensifica el éxodo demográfico desde el campo a la ciudad. Las desigualdades entre las zonas rurales y urbanas siguen en aumento.

Fuente: National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) y www.visibleearth.nasa.gov

Los factores expulsores de la población rural hacia las ciudades son múltiples y complejos. La casuística es muy amplia pero, de forma general, se pueden citar algunos factores negativos como la pérdida de productividad de las tierras agrícolas, las débiles e imperfectas estructuras del mercado, problemas en los canales de comercialización, la falta de fuentes de crédito para pequeños agricultores y la distribución desigual de la tierra.

En cuanto al futuro, algunas proyecciones demográficas de UNFPA prevén que, en 2030, Asia, África, Latinoamérica y Caribe dupliquen los volúmenes de población urbana registrados en el año 2000. Así por ejemplo, en Asia se calcula un incremento de 1.280 millones de habitantes urbanos en ese periodo, de 448 millones en África y de 215 millones de habitantes en las ciudades latinoamericanas y caribeñas. Se espera que este crecimiento de la población urbana se focalizará, preferentemente, en las ciudades medianas y pequeñas, aquellas que tienen menos de 500.000 habitantes.

El Banco Mundial (2008, p.xii) recomienda a los países afrontar estrategias y políticas de urbanización diferenciadas en función de los retos que deben afrontar y del nivel de desarrollo actual de los procesos socioeconómicos y de urbanización en que están envueltos cada uno de ellos.

1. En los países más rurales, el Banco Mundial recomienda que los gobiernos mantengan políticas neutrales desde el punto de vista geográfico y que establezcan las bases para que el proceso de urbanización ocurra naturalmente. Las políticas de tierras y la provisión de servicios básicos deben ser prioritarias.
2. En los lugares en rápido proceso de urbanización, los gobiernos deben poner en marcha, además de las políticas antes mencionadas, una infraestructura que integre y que permita compartir más ampliamente los beneficios de una densidad económica en crecimiento.
3. Por último, en lugares donde la urbanización está en estado muy avanzado, además de instituciones e infraestructura, es probable que se necesiten intervenciones focalizadas para resolver el problema de los barrios pobres.

No obstante, existe un debate sobre la forma de promover una urbanización acertada entre los expertos que opinan que conviene prestar atención a las aldeas, donde se concentran la mayor parte de los pobres, y aquellos que creen que la clave para salir de la pobreza está en las ciudades, donde se acumula la mayor parte de la riqueza mundial.

Uno de los mayores exponentes del proceso de urbanización en el mundo son las grandes ciudades con poblaciones iguales o superiores a 10 millones de habitantes. En 1975 sólo había cuatro, en el año 2000 había 18 y Naciones Unidas estima que, en 2015, habrá, al menos, 225 megalópolis.

El proceso de urbanización conlleva una serie de consecuencias más o menos complejas que afectan a aspectos ecológicos y ambientales y a la dimensión socioeconómica. Vinuesa y Vidal (1991) señalan los siguientes efectos:

Población actual de las principales ciudades del mundo

CIUDAD	HAB.	PAÍS	CIUDAD	HAB.	PAÍS
Tokyo	29.870.000	Japón	Yakarta	8.620.000	Indonesia
Nueva York	21.200.000	EE.UU.	Manila	8.595.000	Filipinas
México	18.330.000	México	Dhaka	8.545.000	Bangladesh
Sao Paulo	17.880.000	Brasil	Washington	7.610.000	EE.UU.
Seúl	17.500.000	Corea Sur	Londres	7.355.000	Reino Unido
Osaka	16.425.000	Japón	Hong Kong	7.100.000	China
Los Ángeles	16.370.000	EE.UU.	San Francisco	7.040.000	EE.UU.
Bombay	16.370.000	India	Chongqing	7.000.000	China
Calcuta	15.000.000	India	Teherán	6.835.000	Irán
Estambul	14.500.000	Turquía	Lima	6.740.000	Perú
Shanghai	13.585.000	China	Bangkok	6.545.000	Tailandia
El Cairo	13.000.000	Egipto	Essen	6.480.000	Alemania
Delhi	12.790.000	India	Chennai	6.425.000	India
Buenos Aires	11.460.000	Argentina	Wuhan	6.200.000	China
Pekín	11.300.000	China	Filadelfia	9.190.000	EE.UU.
París	11.175.000	Francia	Bogotá	6.080.000	Colombia
Río Janeiro	10.895.000	Brasil	Detroit	5.760.000	EE.UU.
Moscú	10.500.000	Rusia	Bangalore	5.685.000	India
Karachi	9.800.000	Pakistán	Hyderabad	5.535.000	India
Tianjin	9.315.000	China	Dallas	5.220.000	EE.UU.
Chicago	9.160.000	EE.UU.	S. Petesburgo	5.130.000	Rusia
Nagoya	9.000.000	Japón	Lahore	5.010.000	Pakistán

Fuente: http://www.globalgeografia.com/world/

1. Incremento de la población urbana: en las ciudades y megalópolis el crecimiento demográfico suele ser mayor y más rápido que el producido en el conjunto regional correspondiente como consecuencia de los procesos inmigratorios y del elevado crecimiento vegetativo.
2. Aumento del número de ciudades: especialmente en las fases intermedias y avanzadas de la urbanización de modo que, frecuentemente, los núcleos satélites de una gran ciudad adquieren la categoría de urbanos.
3. Expansión del espacio urbanizado: los habitantes de los núcleos urbanos y las actividades económicas desarrolladas en ellos cada vez demandan más suelo. Los transportes y las infraestructuras viarias reducen el efecto de rozamiento del espacio de manera que la ciudad se extiende geográficamente.
4. Crecimiento de los sectores industrial, comercial y de servicios, propiciado por las ventajas económicas de la localización en las aglomeraciones urbanas.
5. Transformaciones de las estructuras sociales: el cambio de trabajo y del ámbito geográfico de residencia para los inmigrantes implica un cambio de cultura, de los valores y de los comportamientos demográficos, culturales, etc.
6. Ambientales: las aglomeraciones urbanas influyen localmente en el clima, generando islas de calor, mayor contaminación atmosférica, mayor número de días con tormentas, mayor escorrentía superficial del agua al reducirse la filtración de agua como consecuencia de la omnipresencia de cubiertas artificiales.



Figura 203: Mosaico de imágenes de la Tierra, ensamblado con los datos multitemporales del satélite DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), obtenidos por el sensor OLS (Operational Linescan System). Aunque originalmente se diseñó para detectar las nubes a la luz de la luna, debido a su elevada sensibilidad radiométrica incluso de noche, los científicos pronto apreciaron su utilidad para generar un mapa de localización de luces permanentes en la Tierra. Las áreas iluminadas se corresponden con las zonas más urbanizadas aunque, no necesariamente, con las más pobladas.

Como se ha dicho en la figura anterior, si algo sorprende, a primera vista, es la desigual distribución de la población y de las zonas urbanas. Esta imagen ilustra no solo la distribución de la población urbana en el mundo sino también las pautas de la ocupación humana de los continentes. Es indicativa de la preferencia, en la ocupación humana, por las costas frente al interior de los continentes, por las latitudes superiores a los 35º e inferiores a los 70º. También se intuye una relación entre iluminación y desarrollo socioeconómico, pues no solo los países desarrollados de Europa y América están muy iluminados sino también los poblados países emergentes del sureste asiático.

Asimismo, se aprecia una relación entre las "líneas lumínicas" y las principales redes de comunicaciones. En ocasiones, éstas últimas han condicionado o guiado el desarrollo urbano a lo largo de ellas. Otras veces son consecuencia del proceso de urbanización de los territorios. Algunos ejemplos se observan en África, a lo largo del río Nilo. Otros, en Estados Unidos, donde líneas paralelas de luz surcan el Medio Oeste hacia Denver y las Montañas Rocosas. En Rusia, radios de luz convergen en Moscú, en un poblamiento centralizado. En Asia Central, el trazado del Transiberiano, crea un reguero de luz, en una expansión también planificada. La luz, en el Hemisferio Sur, se corresponde con sus puertos y su pasado colonial.

Como se ha dicho antes, como contrapartida a las zonas urbanizadas se encuentran los vastos espacios inhabitados o débilmente ocupados: desiertos, zonas polares y grandes espacios forestales tropicales y boreales. Todos ellos están oscuros.

Fuente: www.visibleearth.nasa.gov

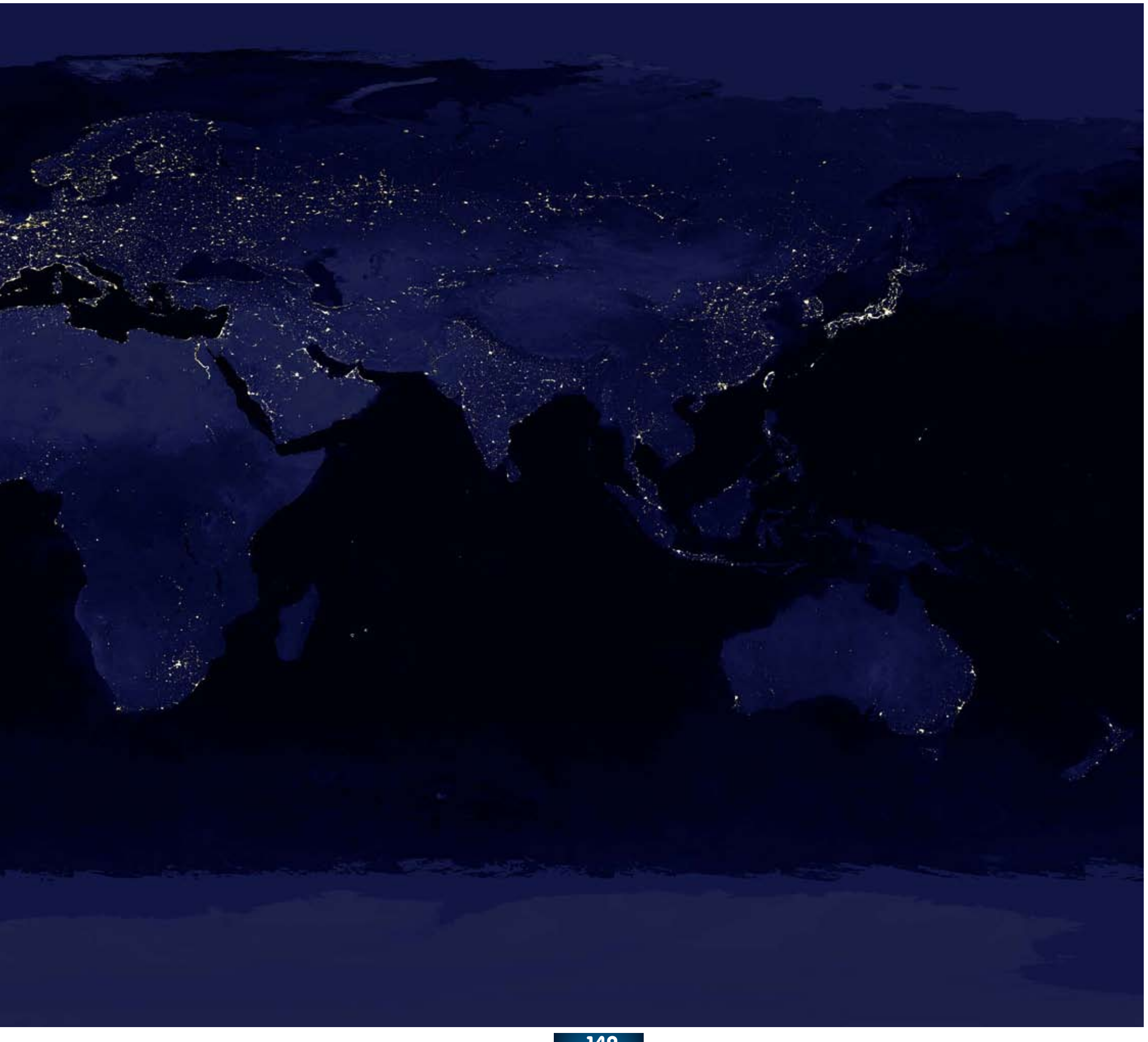






Figura 204: Imagen ASTER, en falso color convencional, adquirida desde el satélite TERRA el 16 de junio de 2000 sobre la ciudad de Estambul, Turquía.

La imagen muestra el estrecho del Bósforo que conecta el mar de Mármara, al sur, con el Mar Negro, al norte, fuera de la imagen. Este estrecho tiene una importancia estratégica ya que, además de su función de conector marítimo, separa los continentes de Europa y Asia en esta zona.

Estambul se localiza en la orilla suroccidental del estrecho, sobre la península conocida, históricamente, como el Cuerno de Oro, por la forma que tiene. En el extremo oriental del cuerno se diferencia una mancha rojiza que se corresponde con los jardines del Palacio de Topkapi. A pesar de que la capital de Turquía es Ankara desde 1923, Estambul ha sido, bajo diversos nombres, la capital histórica del Imperio Romano de Oriente y, más tarde, del Imperio Otomano. Sigue siendo la ciudad más poblada del país. La oficina estadística turca estima que esta megalópolis tiene una población superior a 14 millones y medio de habitantes. La zona histórica tiene un plano de tipo irregular, con calles estrechas que no siguen una dirección dominante. Desde 1985, la UNESCO la declaró Patrimonio de la Humanidad. Para unir la parte europea y asiática, las autopistas O1 y O2 utilizan dos puentes que cruzan el Bósforo, visibles en el centro y norte de la imagen.

Las zonas forestales de Sakarya Kislasi y Baklaci, al norte y noreste respectivamente, destacan por su color rojo y textura gruesa. Las masas de agua han sido reemplazadas por una imagen térmica. Las aguas frías y profundas se visualizan en color azul oscuro mientras que las aguas más cálidas se ven en color azul más claro. Nótese la diferencia de temperatura entre las aguas del estrecho, muy transitadas por los barcos, y las del mar de Mármara y de los embalses del norte de la imagen.

Fuente: asterweb.jpl.nasa.gov

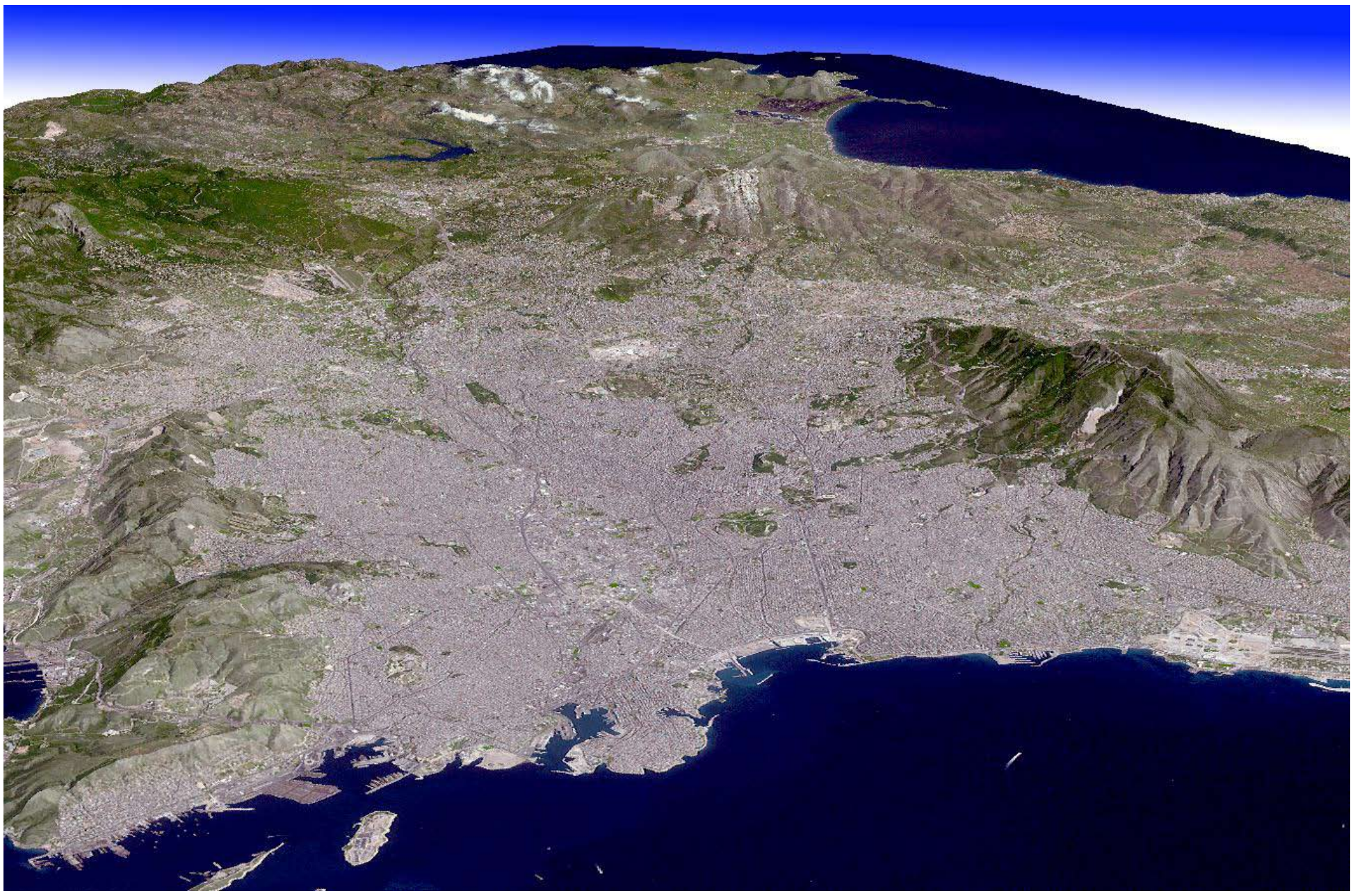


Figura 205: Imagen ASTER adquirida el día 29 de abril de 2004, sobre la ciudad de Atenas, Grecia. Esta imagen oblicua ha sido proyectada sobre un Modelo Digital de Elevaciones generado a partir de un par estereoscópico captado por el mismo sensor.

Aglutina a una población de más de 3,5 millones de habitantes. Se trata de la ciudad griega más habitada. Está localizada en el sureste del país. Como se observa en el primer plano de la imagen, se asienta sobre la llanura del Ática, abierta al golfo de Egina. Está rodeada por distintas cadenas montañosas, al norte, al sur y al este. El puerto de El Pireo, a 8 km. al suroeste de Atenas, cumple una función estratégica desde los puntos de vista comercial y de servicios.

Esta capital fue la sede de los Juegos Olímpìcos de 2004. El gobierno griego invirtió gran cantidad de recursos en nuevos equipamientos deportivos y en nuevas infraestructuras de acceso a las instalaciones.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 206: Imagen ASTER en falso color convencional, adquirida, por el satélite TERRA, el 23 de julio de 2000 sobre la ciudad de París, Francia.

La gran mancha azul que se observa en el centro de la imagen se corresponde con la gran aglomeración urbana de París, ocupada por una superficie construida densa y continua. Su área metropolitana concentra una población próxima a los 10 millones de habitantes. Llama la atención la corriente fluvial del Sena (forma lineal de color negro) que atraviesa la ciudad, desde el sureste hasta el oeste, de forma meandriforme.

Contrasta la compacidad urbana del centro de la ciudad, en la que se intercalan algunos parques urbanos y zonas verdes (en color rojo) con las zonas periféricas. En éstas, predominan los colores rojos de los bosques como el Bois de Boulogne, en el centro oeste de la imagen, Versalles, en el suroeste, o el Bois de Vincennes, en el centro este. Además, en las áreas occidentales y orientales se aprecian amplias zonas de color rojo en las que se entremezcla el color azul, con una textura gruesa. Se trata de las zonas urbanas periféricas menos densas con espacios ajardinados.

A grandes rasgos, se aprecia un plano radioconcéntrico en el centro de la ciudad, cuyo eje es la Cité, es decir la isla de Nôtre Dame que forma el Sena, en el área central de la imagen. Las grandes arterias que comunican el centro con la periferia se evidencian a través de las autopistas y vías férreas, en color gris. También se observa el gran bulevar periférico que rodea, circularmente, el centro de la ciudad.

Fuente: http://visibleearth.nasa.gov



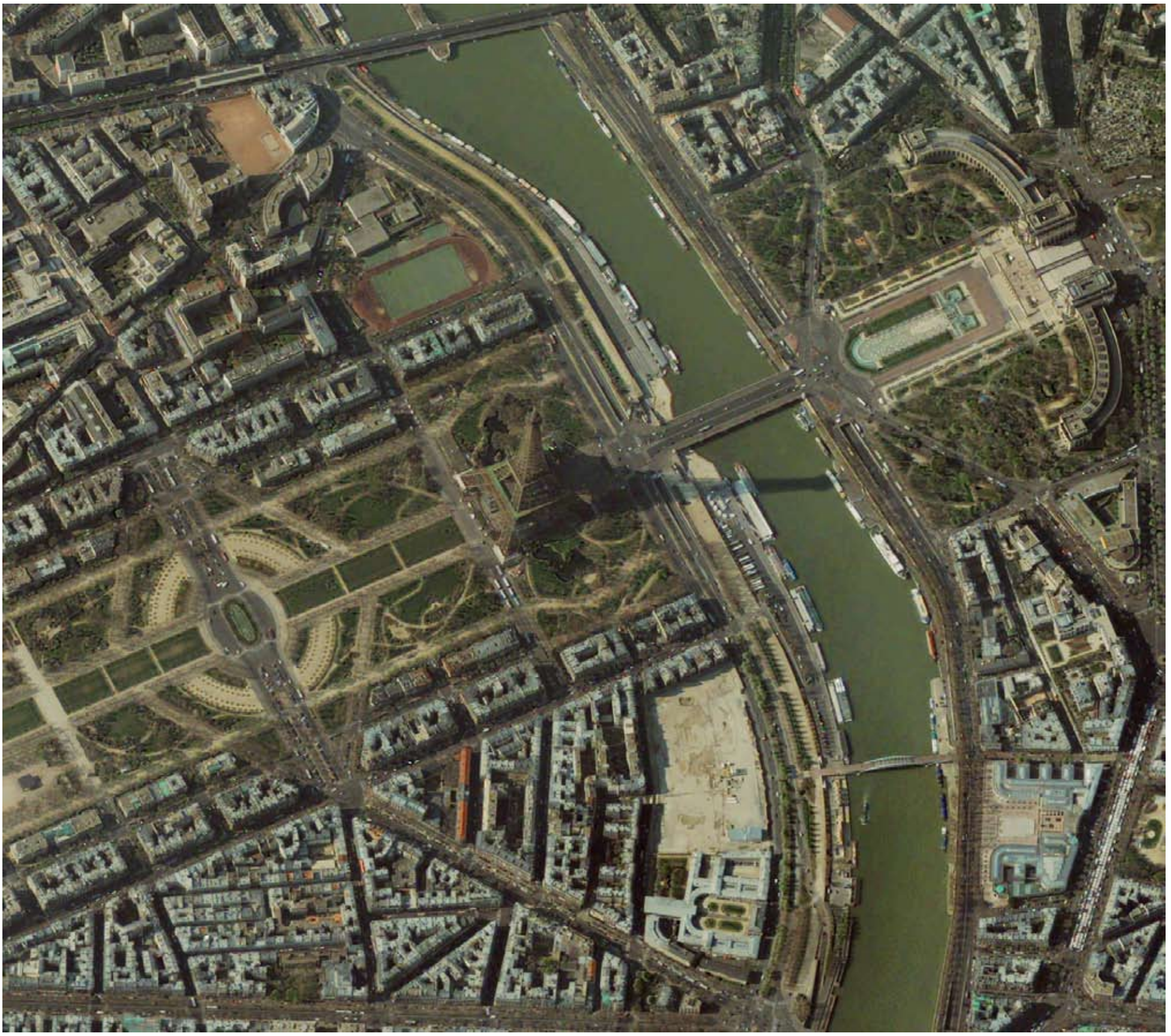




Figura 207: Imagen QuickBird, en color natural, adquirida el 27 de marzo de 2002 sobre la torre Eiffel, París.

Esta imagen, de muy alta resolución espacial, aporta un nivel de detalle similar al de las fotografías aéreas. En ella, se observan, a nivel individual, los edificios, sus patios interiores, los vehículos y barcos que navegan sobre el Sena, la disposición de las calles y puentes y otros elementos que configuran la ciudad.

En el centro de la imagen, a la izquierda del río, se aprecia la majestuosidad de la Torre Eiffel, que domina la amplia explanada de césped del Campo de Marte, a su izquierda. La sombra de la torre es proyectada sobre el río, pudiéndose calcular, fácilmente, su altura. Un poco más arriba, en la margen izquierda del Sena, se localiza una pista polideportiva. El área de césped, con forma rectangular, contrasta con la pista de tierra que rodea, periféricamente, la zona verde.

En la margen derecha del río, enfrente de la Torre Eiffel, se puede distinguir la plaza del Trocadero y el Palacio de Chaillot, con forma de paréntesis, en la parte más alta de la ribera.

Fuente: www.digitalglobe.com



Figura 208: Imagen IKONOS adquirida el 2 de abril de 2001 sobre la ciudad de Venecia, Italia.



Como es sabido, Venecia es Patrimonio de la Humanidad por la concentración de edificios de gran valor histórico artístico y por su originalidad. Asentada sobre una gran laguna, separada del Adriático por la isla de Lido, al sur (fuera de la imagen), está amenazada por un progresivo hundimiento. Está caracterizada por un plano de tipo irregular en el que las calles, de color azul, están cubiertas por agua. Es destacable el Gran Canal, que se observa en el centro de la imagen, formando una S invertida. Los barcos son el principal medio de transporte de la ciudad. Se aprecian en la imagen, como pequeñas tiras alargadas de color blanco sobre la masa azul del agua y, en algunos casos, es visible su estela.

En el cuadrante noroeste de la imagen se aprecia la estación terminal de ferrocarril, de gran tamaño, forma rectangular y color gris, y las vías férreas y autopista que unen la ciudad con tierra firme. En el centro oeste se distinguen las grandes infraestructuras portuarias y la terminal de pasajeros. En el extremo sureste se localiza la plaza de San Marcos, con forma alargada. A su derecha, se aprecia el Palacio Ducal que forma una U, de color blanco. A su izquierda, se observa la estrecha y alargada sombra del "campanille".

Cortesía de Robert Simmon, NASA's Earth Observatory. Datos de Space Imaging.

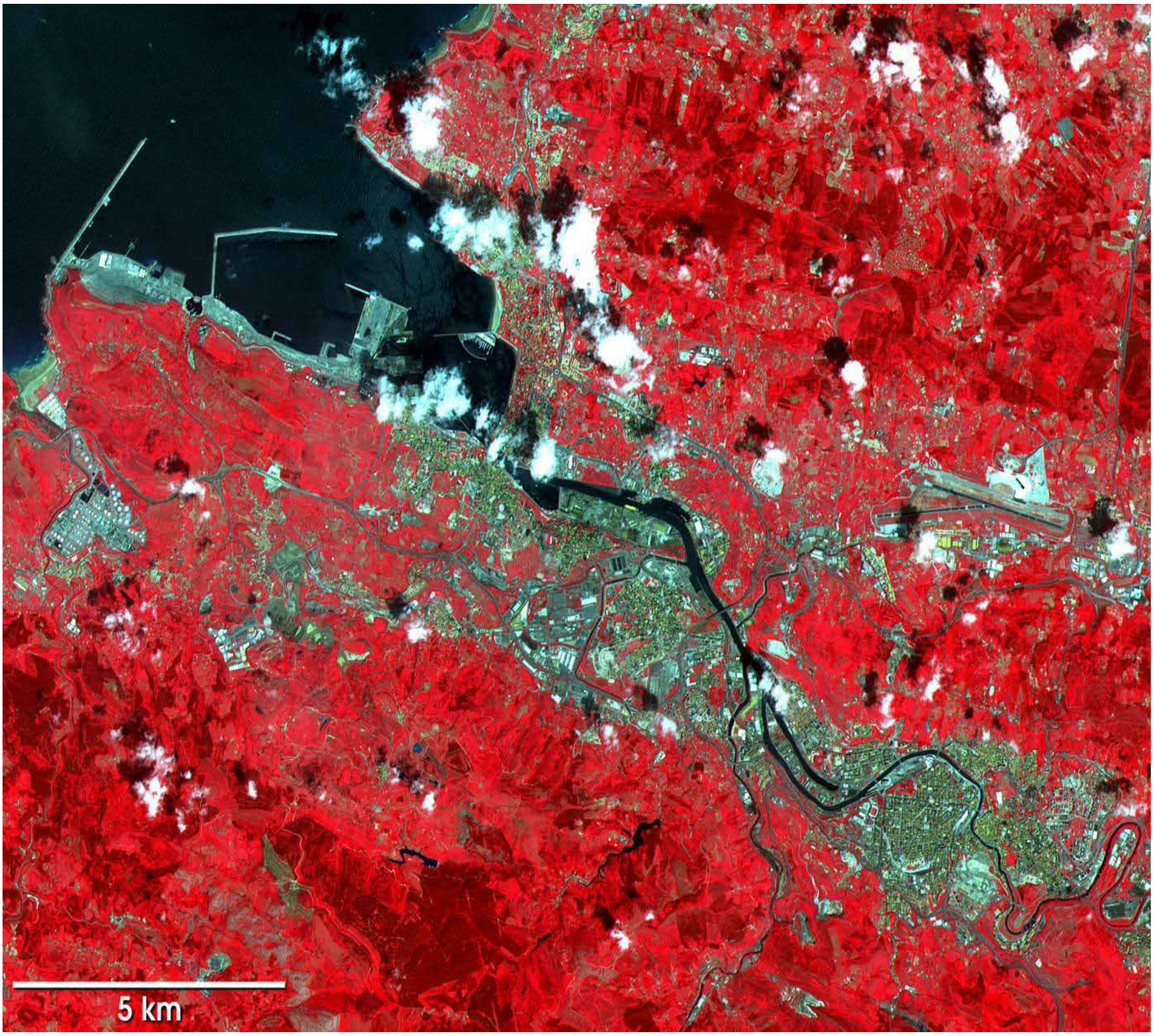




Figura 209: Imagen ASTER en falso color convencional adquirida, desde la plataforma espacial TERRA, el 5 de julio de 2000 sobre la desembocadura del río Nervión, la Bahía de Vizcaya y el área metropolitana de Bilbao, España.

En color negro o azul oscuro se aprecia la lámina de agua de la ría y las aguas del gran puerto de Bilbao y de su bahía. Se distinguen los alargados espigones del puerto y, en color azul medio, las infraestructuras portuarias. En color rojo, se observan las zonas cubiertas de vegetación herbácea (prados) y arbórea (bosques), en color rojo más oscuro (suroeste de la imagen). Las nubes, en color blanco, cubren algunas zonas de la desembocadura del Nervión. Incluso, pueden apreciarse sus sombras, en color negro.

En colores azules y verdes, con textura rugosa, se diferencian los núcleos urbanos del área metrolitana bilbaína, enlazados por las infraestructuras viarias. En la margen derecha de la ría se localizan Getxo y Neguri. En la margen izquierda, desde el este hacia el oeste, se encuentran Barakaldo, Sestao, Portugalete y Santurtzi, formando un continuo urbano. En el oeste de la imagen es distinguible la autopista A8 y la refinería de Petronor, cerca de la costa. Se ven las formas circulares de los grandes depósitos de combustible.

Fuente: http: //visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?7359

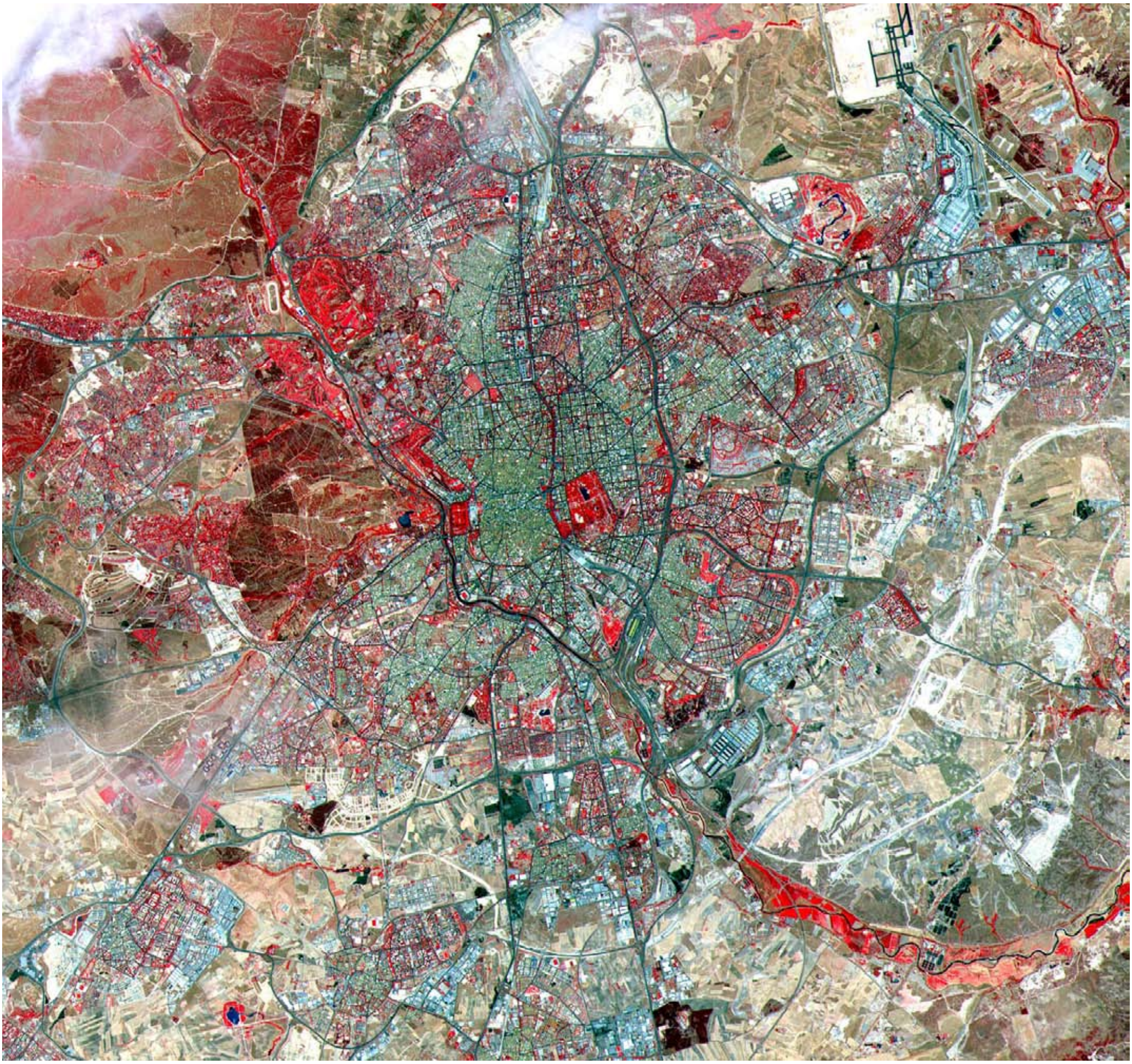


Figura 210: Imagen ASTER, en falso color convencional, adquirida el 5 de julio de 2000 sobre la ciudad de Madrid, España.

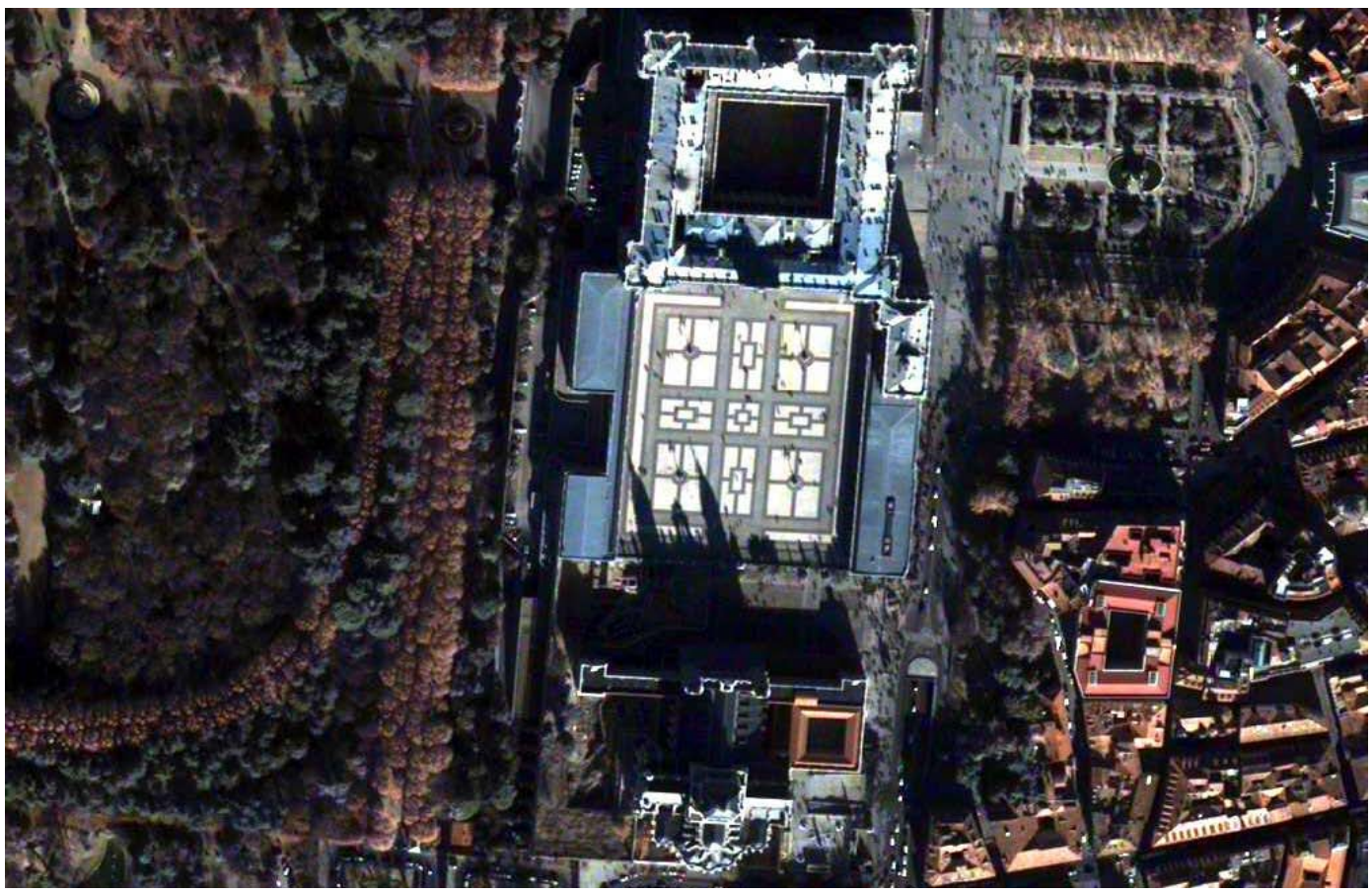
La ciudad de Madrid, capital de España, alberga más de 3 millones de habitantes y su área de influencia concentra casi 6 millones de habitantes. En un medio físico, sin grandes obstáculos, las vías de comunicación configuran, a grandes rasgos, un crecimiento radioconcéntrico. Las carreteras y autopistas comunican Madrid con el resto de ciudades españolas y dibujan una red radial. Salen de la ciudad por el norte, noreste, este, sur, suroeste y noroeste. Los ejes concéntricos muestran las distintas fronteras en el crecimiento de la ciudad. Rondas y bulevares ocupan hoy el espacio de la cerca. Los distintos modelos de plano de Madrid son el reflejo de las concepciones urbanísticas de cada época. El centro, anterior al siglo XIX, dispone de un plano irregular, de calles estrechas, entre las que hay algunas vías radiales, desde la plaza del mercado hacia las puertas de la cerca. En el siglo XIX, la ciudad crece hacia el norte y este en el Ensanche. Un plano de tipo damero caracteriza esta zona de la ciudad. Las calles están trazadas siguiendo los puntos cardinales: norte-sur y este-oeste. Las manzanas son cerradas. Desde 1920, la periferia busca, en la manzana abierta, una respuesta higienista a la ciudad compacta. La ciudad crece a lo largo de los ejes radiales mediante la anexión de municipios vecinos, primero, y mediante la configuración de un continuo urbano, después. Los espacios intermedios entre los ejes radiales se van ocupando progresivamente, haciendo más compacta la ciudad. En el norte y oeste se aprecian zonas de la ciudad en las que el tejido urbano, de textura gruesa, se mezcla con colores rojizos. Se trata de las urbanizaciones con grandes espacios abiertos ajardinados.

Las propiedades reales, hoy parques públicos (Retiro en el centro, Casa de Campo en el oeste y monte de El Pardo al noroeste), han condicionado poderosamente el desarrollo de la ciudad. Los colores rojos y pardos se corresponden con las masas arbóreas de estas grandes zonas verdes. En su interior se observan pequeños estanques y lagos, en color negro o azul oscuro. La abundancia de superficies en color blanco nos remite al gran dinamismo urbanístico de la ciudad. Grandes desarrollos en el este y norte confirman hoy las líneas de crecimiento histórico de esta ciudad desde su fundación en el siglo IX. Asimismo, están relacionadas con las grandes infraestructuras en construcción. En el noreste, se aprecia la construcción de la nueva terminal del aeropuerto de Barajas y en el este se construyen las líneas del tren de alta velocidad y la autopista M-45.

Fuente: http://asterweb.jpl.nasa.gov







Figuras 211 (arriba) y 212 (centro): Dos fragmentos de una imagen QuickBird, en color natural, adquirida el 12 de diciembre de 2001 sobre la ciudad de Madrid, España.

En la imagen superior se observa parte del casco histórico de la ciudad. En el noroeste de la imagen se perciben la plaza Mayor, con forma cuadrada, y la Puerta del Sol, con forma semicircular. Al sur y el este se diferencian avenidas anchas que están recorridas por las rondas y por el Paseo del Prado. Entre estas vías se extiende el centro de la ciudad con un plano irregular, como ya se ha comentado. Al sur y este se abren nuevas zonas con un plano diferente, en forma de damero y con manzanas cerradas. En el este de la imagen se aprecia parte del Parque de El Retiro y el Jardín Botánico, al sur del Museo del Prado. En la esquina sureste de la imagen se diferencia la estación de Atocha, una gran infraestructura ferroviaria, de forma rectangular y color blanco.

En el centro de la imagen inferior se observa el Palacio Real y el patio de armas, en el sur. En el oeste se localizan los jardines del palacio. Al sur se encuentra la catedral de La Almudena. Obsérvese la forma de su fachada principal y la altura de sus torres apuntadas en la sombra proyectada por ellas. En esta fecha, la altura del sol sobre el horizonte es muy baja y se magnifica el efecto de las sombras.

Fuente: www.digitalglobe.com

Figura 213: Imagen QuickBird, en color natural, sobre la ciudad de Barcelona, España.

En el centro de la imagen se observan las instalaciones olímpicas de Montjuich, espacio elevado que domina topográficamente la ciudad y el puerto. Es reconocible el estadio olímpico por el color verde del césped, rodeado del color rojizo de la pista perimetral y del blanco del graderío. Al suroeste, también se distingue el Palau Sant Jordi, pabellón deportivo cubierto. Al norte de Montjuich se localiza el recinto ferial de Barcelona, caracterizado por edificios de grandes dimensiones de colores blanco y gris. Desde la Plaza de España hacie el este, el Paralelo divide la zona del Ensache de Cerdá, al norte, con un plano en damero, del Poble Sec, al sur, con manzanas más pequeñas y un plano menos ordenado. En la esquina noreste de la imagen se encuentra el casco histórico de la ciudad, con un plano de tipo irregular.

Al este se aprecia el paseo marítimo y el puerto. Además de los espigones y dársenas, en el sureste de la imagen se distingue la estación de contenedores del puerto. Se trata de una gran explanada multicolor. Al oeste de ella se distinguen los grandes depósitos de combustible, de color blanco y forma circular.

Fuente: www.digitalglobe.com





Figura 214: Vista tridimensional, mirando hacia el este-sureste, sobre la ciudad de El Cabo, Sudáfrica.

Se ha fusionado una imagen LANDSAT en color natural, adquirida el 13 de junio de 2000, sobre un modelo digital de elevaciones generado con los datos registrados, en febrero de 2000, por el instrumento SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), a bordo del Space Shuttle Endeavour. La escala vertical ha sido exagerada dos veces con el fin de realzar la sensación del relieve.

La ciudad de El Cabo aparece en primer plano, en la esquina inferior izquierda de la imagen, sobre la meseta que separa las dos bahías situadas a ambos lados del cabo de Buena Esperanza, en el extremo inferior derecho de la imagen. Este asentamiento surgió, en el s. XVII, como centro de avituallamiento de las embarcaciones que hacían la ruta hacia las Indias orientales, la ruta mercantil habitual entre Europa y el Extremo Oriente antes de la apertura del Canal de Suez, en 1869.

Actualmente, es la segunda ciudad más poblada de Sudáfrica. Concentra cerca de 3 millones y medio de habitantes y es sede del Parlamento y de otras organizaciones gubernamentales.

Posee un clima mediterráneo y una rica diversidad biogeográfica en un entorno que alterna espacios montañosos, llanuras y zonas litorales. Las moderadas precipitaciones eran almacenadas en embalses de los piedemontes próximos a la ciudad. El crecimiento de la población urbana obliga, ahora, a ampliar la zona de abastecimiento de agua. En el centro izquierda de la imagen se observa un embalse más lejano, el de Theewaterskloof.

Cortesía de SRTM Team NASA/JPL/NIMA



Figura 215: Imagen ASTER, en color natural, adquirida el 8 de septiembre de 2002 sobre la ciudad de Nueva York, Estados Unidos.

Emplazada sobre el estuario del río Hudson, el área metropolitana de Nueva York alberga a una población de 8,4 millones de habitantes, siendo la ciudad más poblada de Estados Unidos y la segunda aglomeración urbana del continente americano. La ciudad se asienta sobre la isla de Manhattan, en el centro de la imagen, Long Island, al sureste, y Staten Island, al suroeste. El río Hudson, que recorre el centro de la imagen en dirección norte-sur, separa la isla de Manhattan de Nueva Jersey, en su orilla derecha. A pesar de la extensa superficie construida y de la elevada densidad de población, se aprecian extensas zonas verdes repartidas a lo largo de la ciudad. Una de las más emblemáticas y visitadas es Central Park, que aparece como un alargado rectángulo verde, en el centro de Manhattan, interrumpido por su amplio lago. El plano de tipo damero, con calles que se cruzan ortogonalmente, en ángulo recto, es típico en Manhattan. También se observa el aeropuerto de La Guardia, en el norte de Long Island, en forma de cruz.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



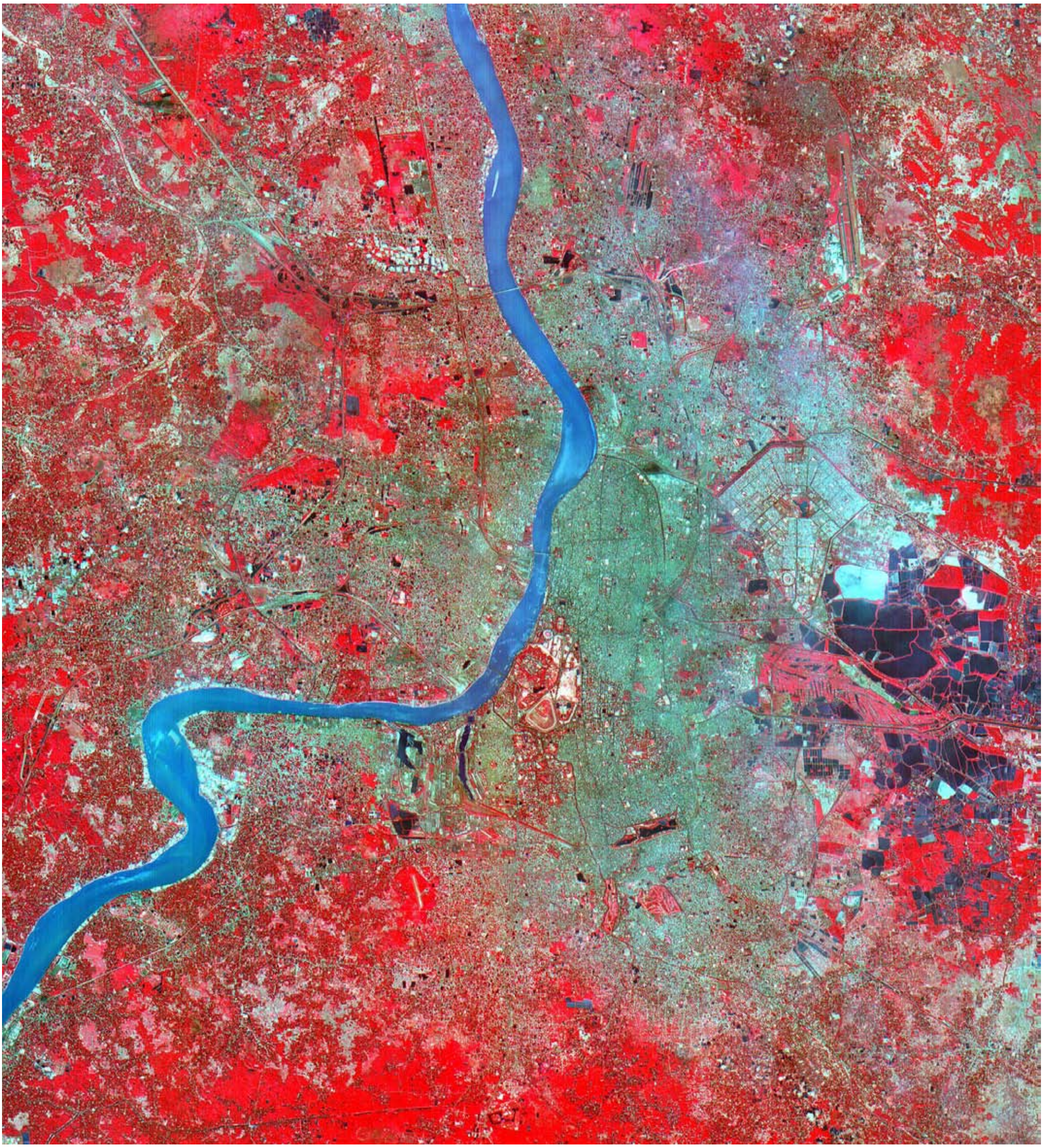




Figura 216: Imagen ASTER en falso color adquirida, desde el satélite TERRA, el 29 de marzo de 2000 sobre la ciudad de Calcuta, India.

Se localiza, geográficamente, en la macro-región del delta del Ganges sobre una gran llanura aluvial. Se asienta a orillas del río Hooghly, que recorre la imagen de norte a sur. Los primeros pobladores europeos llegan en 1690 con la intención de establecer allí la sede de la Compañía Británica de las Indias Orientales. Desde entonces ha experimentado un gran desarrollo demográfico y económico. En la actualidad, se estima que tiene una población de 4 millones y medio de habitantes y que, junto a su área metropolitana, concentra una población que rebasa los 15 millones. La gran mancha azul-verdosa del centro de la imagen se corresponde con la extensa zona urbana construida. En el centro de la ciudad predomina un plano reticular. Desde el punto de vista de la estructura urbana, es llamativo el sector nororiental de la ciudad, llamado Salt Lake City. Tiene una forma casi hexagonal. Adosados a él se encuentran los humedales del este de la ciudad (East Calcutta Wetlands), zona pantanosa protegida por el Convenio de Ramsar. Estas áreas inundadas se diferencian en color negro.

Fuente: http://asterweb.jpl.nasa.gov





Figura 217: Imagen, en color natural, adquirida por el satélite GeoEye-1 sobre la ciudad de Canberra, Australia.

Situada en el sureste de Australia, entre Sídney y Melbourne, es la capital del país. Administrativamente, posee una demarcación conocida como Territorio de la Capital Australiana (ACT). Es una ciudad mediana que concentra una población de unos 300.000 habitantes. En 1908 se tomó la decisión de compromiso de ubicar la capital del país en este territorio, como alternativa a las dos grandes ciudades, antes mencionadas. Es sede del gobierno y del parlamento de Australia.

Así pues, se trata de una ciudad planificada. Se abrió un concurso internacional de ideas y se seleccionó el proyecto del arquitecto estadounidense Walter Burley Griffin. El proyecto se enmarca en la tendencia de las ciudades jardín. Como se puede apreciar en la imagen, las áreas verdes están integradas en la ciudad, en forma natural, mediante la conservación de la vegetación autóctona, y en forma ornamental, mediante la plantación de setos vegetales que separan una vivienda de otra. En torno al lago artificial (al norte y este de la imagen), formado por el represamiento del río Molonglo, se distribuye la ciudad organizada, funcionalmente, en barrios. En la imagen se aprecia el área administrativa. Las calles tienen una disposición radioconcéntrica en torno al Parlamento (en el centro).

Fuente: http://www.geoeye.com/CorpSite/gallery/detail.aspx?iid=96&gid=11





Figura 218: Imagen QuickBird, en color natural, adquirida el 4 de abril de 2002 sobre la bahía de Sídney, Australia.

Sídney está emplazada a orillas de la bahía, en la que el Océano Pacífico forma una profunda ría. Por ese motivo, Puerto Jackson es uno de los mayores puertos naturales del mundo. Fundada en 1788, es la primera colonia británica en Australia. Actualmente, es la ciudad más poblada del país. Su área metropolitana concentra una población de 4,3 millones de habitantes.

En la imagen se aprecia el centro financiero de la ciudad, ocupado por altos y modernos edificios de oficinas. Al este, se diferencia una gran zona verde donde se localiza el Real Jardín Botánico. En la punta norte de este sector se ubica la Ópera House, cuyas peculiares cubiertas blancas son bien visibles en la imagen. Diseñada por el arquitecto danés Jørn Utzon en 1957, fue inaugurada en 1973 y declarada Patrimonio de la Humanidad en 2007. A su izquierda se observa el muelle donde se embarca en los ferries que recorren la bahía. Al oeste de la imagen se aprecian los grandes muelles e instalaciones portuarias. Al norte se distingue una parte del famoso puente de estructura metálica que atraviesa la bahía hacia North Sydney.

Fuente: www.digitalglobe.com













Figura 219: Vistas oblicuas de algunas ciudades del mundo.

a) Vista del casco histórico de la parte europea de Estambul. Santa Sofía, al fondo.
b) Vista del Sena desde la Torre Eiffel y de los barrios de París, al oeste del río.
c) Vista de la Plaza de San Marcos, del Palacio Ducal y del Campanille, Venecia, Italia.
d) Vista del Lower Manhattan desde el Empire State.
e) Vista del Parlamento de Australia, en la ciudad de Canberra, desde el lago Burley Griffin.
f) Ópera House de Sídney.

Fuente: Susana de Pablos, Alejandro Martínez de Pablos y Javier Martínez Vega

6.7. VERTIDOS DE PETRÓLEO AL MAR

Los grandes centros productores de petróleo suelen estar bastante alejados de los países industrializados que más petróleo demandan y consumen. Por ese motivo, una parte importante de la producción es transportada por barco a lo largo de océanos y mares de todo el planeta.

Según Oceana (2010), cada año se transportan, por vía marítima, entre 1.500 y 1.800 millones de toneladas de crudo a bordo de miles de buques petroleros, suponiendo el 35% del transporte mundial marítimo. Además, se transportan entre 400 y 500 millones de toneladas de productos refinados, como gasolina y gasóleo. Europa es el principal receptor de estos productos, llegando a recibir cerca de 500 millones de toneladas anuales de crudo y entre 250 y 300 millones de toneladas de productos refinados.

Se estima que, anualmente, más de 3 millones y medio de toneladas de petróleo contaminan el medio marino y que, diariamente, se vierte un volumen equivalente a 5.000 barriles de crudo. Estos vertidos de hidrocarburos generan lo que, coloquialmente, se conoce con el nombre de marea negra. Siguiendo a Borrás (2010), se denomina marea negra a *"la masa oleosa que se crea cuando se produce un derrame de hidrocarburos en el medio marino. Se trata de una de las formas de contaminación más graves, pues no sólo invade el hábitat de numerosas especies marinas sino que, en su dispersión, alcanza igualmente costas y playas, destruyendo la vida a su paso o alterándola gravemente, a la vez que se generan grandes costes e inversiones en la limpieza, depuración y regeneración de las zonas afectadas"*.

Según estudios de la National Academy of Sciences de Estados Unidos, el 64% de los vertidos de petróleo al mar procede, a través de las aguas continentales y de la atmósfera, desde el territorio emergido en forma de residuos industriales y urbanos. El 36% restante es vertido por los petroleros que transportan el crudo, por otros navíos y por las plataformas petrolíferas o bien han sido originados por accidentes. Aunque éstos son imprevisibles, es evidente que el estado de los buques agrava el impacto de los mismos. A esta circunstancia, se debe añadir el complicado tejido empresarial del comercio marítimo. Es significativo que el 84% de los buques petroleros, pertenecientes a empresas europeas, estén abanderados en Bahamas, Bermudas, Chipre, Liberia, Malta y Panamá. En la mayoría de ocasiones, las empresas acuden a argucias jurídico-empresariales para abaratar costes y eludir responsabilidades en caso de una catástrofe. El ejemplo del Prestige ilustra magníficamente esta idea que se acaba de exponer (Silos, 2008).

A pesar de la considerable reducción de los vertidos de hidrocarburos en las últimas décadas, éstos siguen siendo un tema de constante debate debido a sus consecuencias ambientales y socioeconómicas. Según datos de CETMAR, el 85% de los derrames de crudo al mar, ocasionados por petroleros y por otros buques, son pequeños, es decir tienen volúmenes menores de 7 toneladas (Keisha, 2005). Ocurren, mayoritariamente, en las operaciones portuarias de carga y descarga y como consecuencia de las prácticas ilegales de limpieza de fondos de los barcos. El programa europeo GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) se ocupa, entre otros objetivos, del seguimiento de estos vertidos a través de imágenes de satélite. A pesar de que, en los últimos años, la legislación es más exigente para evitar este tipo de acciones, todavía sigue ocurriendo esta práctica, dañina ambientalmente.

Los grandes vertidos, en los que se superan las 700 toneladas, son menos frecuentes proporcionalmente. No alcanzan el 3% del total. Sin embargo, son los que ocasionan los mayores impactos ambientales y socioeconómicos como consecuencia de la gran extensión de la marea negra y de la intensidad de daños provocada. Además, los derrames mayores de 700 toneladas han decrecido, significativamente, a lo largo de estos últimos 30 años (Grueiro, 2008; Keisha, 2005). El 63% de estos grandes vertidos son el resultado de colisiones y naufragios. Llaman la atención de la opinión pública a través de los medios de comunicación y quedan en la memoria colectiva. A continuación, se relaciona una lista de algunos de los vertidos más voluminosos relacionados con accidentes ocurridos en plataformas petrolíferas o en los grandes petroleros que transportan el crudo. Desde 1974, la ITOPF (*International Tanker Owners Pollution Federation*) ha creado una base de datos en la cual recoge los vertidos marinos de hidrocarburos accidentales.

Principales vertidos de hidrocarburos ocurridos desde 1967

AÑO	DESCRIPCIÓN	LUGAR	TONELADAS VERTIDAS
1991	Guerra del Golfo	Golfo Pérsico	816.000
1979	Plataforma Ixtoc I	México	476.000
1983	Pozo petrolífero de Nowruz	Golfo Pérsico	272.000
1992	Oleoducto	Uzbekistán	272.000
1983	Petrolero Castillo de Bellver	Sudáfrica	267.000
1991	Petrolero ABT Summer	Angola	260.000
1978	Petrolero Amoco Cadiz	Francia	234.000
1988	Petrolero Odyssey	Canadá	146.000
1979	Petrolero Atlantic Express	Trinidad y Tobago	145.000
1991	Petrolero Haven	Génova	144.000
1980	Pozo petrolífero	Libia	143.000
1979	Petrolero Atlantic Empress	Barbados	141.000
1967	Petrolero Torre Canyon	Reino Unido	130.000
1972	Petrolero Sea Star	Omán	115.000
1980	Petrolero Irenes Serenade	Grecia	100.000
1976	Petrolero Urquiola	La Coruña	95.000
1977	Petrolero Hawaiian Patriot	Honolulu	95.000
1979	Petrolero Independenta	Turquía	95.000
1975	Petrolero Jakob Maersk	Portugal	88.000
1993	Petrolero Braer	Reino Unido	85.000
2002	Petrolero Prestige	La Coruña	77.000
1992	Petrolero Katina P	Mozambique	72.000
1992	Petrolero Mar Egeo	La Coruña	71.000
1989	Petrolero Exxon Valdez	Alaska	45.000
2010	Plataforma Deepwater Horizon	Golfo de México	42.390 (1)

Fuentes: ITOPF, 2010; Borrás, 2010; Tecnun, 2010 y FECYT, 2010

(1) Según Borrás (2010), hasta el 3 de mayo de 2010 se estima que el accidente ocurrido en la plataforma Deepwater Horizon, en el Golfo de México, ha vertido un volumen de 42.390 toneladas de petróleo al mar. Sin embargo, se prevé que esta cantidad aumentará, considerablemente, hasta que terminen las tareas de reparación y/o sellado del pozo petrolífero. Las previsiones de derrame total de crudo, en el mejor escenario, alcanzarán las 72.000 toneladas y, en el peor escenario posible, podría estar comprendido entre 1,43 y 2,25 millones de toneladas, la mayor catástrofe petrolera de todos los tiempos.

Según algunos autores (Etkin y Welch, 1997; Borrás, 2010), las zonas más afectadas por los vertidos de hidrocarburos son el Golfo de México, la costa noreste de Estados Unidos, el Mar Mediterráneo, el Golfo Pérsico, Mar del Norte, Mar Báltico, Canal de La Mancha y Reino Unido, costas oeste de Francia y noroeste de España, Japón, Malasia, Singapur y Corea.

El Mediterráneo es uno de los mares más contaminados por este tipo de vertidos, pudiendo alcanzar unas 490.000 toneladas al año. De todos los vertidos ilegales de hidrocarburos a los mares, el Mediterráneo recibe entre el 45% y el 60% de ellos. Unos 18.000 buques de mercancías peligrosas atraviesan, anualmente, el Estrecho de Gibraltar.

España es uno de los países más afectados por los vertidos de petróleo, pues al riesgo inherente a cualquier país que alberga refinerías en sus

costas, debe añadirse el hecho de que, cerca de la costa gallega, se encuentra el corredor atlántico que ha sido diseñado y señalado para acotar la navegación de mercancías peligrosas hacia Europa.

La densidad de los hidrocarburos determina su flotabilidad en el agua e influye en los procesos de propagación y dispersión natural. Cuando se produce un vertido de hidrocarburos en el mar, se producen inmediatamente cambios en sus propiedades físico-químicas. A este proceso, que se alarga en el tiempo, se le denomina envejecimiento. Posteriormente los hidrocarburos se extienden, formando una mancha de color oscuro con brillos iridiscentes. La excesiva viscosidad limita la extensión del vertido. Generalmente, la propagación es rápida y su coloración delata el espesor aproximado de la mancha.

A medida que los compuestos más volátiles se evaporan, el hidrocarburo se hace más pesado y se puede hundir. Otro proceso producido en el envejecimiento o meteorización es la disolución. Las fracciones de menor peso molecular se diluyen en el agua donde se produce el vertido.

En resumen, el comportamiento de un vertido de petróleo, o de cualquiera de sus derivados en el medio marino, está determinado por su extensión, evaporación, dispersión, disolución, emulsión, sedimentación y otros procesos de degradación (Riazi y Ghazi, 1999).

Por otra parte, la combinación del petróleo con el oxígeno de la atmósfera da lugar al proceso de oxidación, que contribuye a la degradación del petróleo. Además, la dispersión del petróleo genera la formación de emulsiones de petróleo en agua o de agua en petróleo, siendo el oleaje, el principal agente de la emulsión. Las emulsiones de agua en hidrocarburo se forman cuando los petróleos son muy viscosos. Estas emulsiones son muy persistentes y estables. Perduran con facilidad y, a veces, dan lugar a un incremento del volumen del vertido de hasta el 50%. Cuando la emulsión alcanza la costa, ésta se deposita en rocas y arenas evaporándose el agua y originando grumos alquitranados de muy difícil limpieza.

En muchos casos se produce la sedimentación de los petróleos en el fondo del mar. Este proceso se acelera en el caso de los hidrocarburos pesados. Finalmente se produce la biodegradación, debido a la acción de bacterias marinas, hongos, levaduras y otros organismos.

Al producirse un vertido importante de hidrocarburos, el reconocimiento aéreo es esencial para evaluar su importancia y para organizar, de forma efectiva, el control de las operaciones de contención, recolección y limpieza. El uso de las tecnologías de percepción remota es necesario hasta que el vertido esté totalmente controlado. En un primer momento son necesarias imágenes de satélite debido a su fácil disponibilidad. Este primer paso es necesario para diseñar los dispositivos de control del vertido, que deben desplegarse de manera inmediata. Para cumplir estos objetivos se ha generalizado la utilización de imágenes radar, porque la discriminación del vertido con respecto al agua marina es muy nítida. Al tratarse de sensores activos, la disponibilidad de imágenes es independiente de la situación atmosférica, condiciones que tradicionalmente han supuesto un serio inconveniente para los países con climas lluviosos.

Las imágenes de satélite más utilizadas son las que proceden de satélites equipados con radares de apertura sintética (SAR). De una forma simplificada, se puede decir que una imagen radar tomada sobre el mar muestra la rugosidad de la superficie marina. Al tener menor densidad, el crudo presenta una señal de retorno más débil que la del agua de mar no contaminada. Las diferencias de los hidrocarburos en color y densidad se manifiestan en una coloración negruzca, dentro de la escala de grises del radiómetro.

Así pues, la disposición y extensión de la mancha producida por los vertidos de hidrocarburos es fácilmente identificable para un intérprete, como se puede observar en las imágenes que se muestran, como ejemplos, a continuación. Resultan también muy útiles las imágenes de satélite para la localización del punto de vertido (esté varado o no el buque) y para la cuantificación del derrame.

El primer satélite que incorporaba un radar de apertura sintética fue el SEASAT, puesto en órbita en 1978 con el objetivo, de acuerdo con su nombre, de impulsar las investigaciones oceanográficas. Tras los experimentos SIR a bordo del Space Shuttle, la Agencia Espacial Europea puso en órbita el ERS-1 en julio de 1991 y el ERS-2, en 1995. En 1992 también Japón puso en órbita el JERS-1, dotado de un radar trabajando en la banda L y con una resolución espacial de 25 m. En 1995, Canadá envía al espacio el satélite RADARSAT-1, con tecnología similar a los proyectos anteriores. Dispone de sensores radar de variadas resoluciones espaciales y ángulos de incidencia. A éste le ha sucedido, en 2007, RADARSAT-2 que incorpora un SAR avanzado. En 2002, la ESA ha lanzado el satélite Envisat que dispone, entre otros instrumentos, de un radar de apertura sintética avanzado (ASAR), con una resolución espacial de 30 x 30 m., que trabaja en banda C. Este sensor está orientado, entre otras, a aplicaciones marinas.

Para luchar contra las mareas negras se utilizan distintos medios. Los dispositivos más frecuentes son el establecimiento de barreras físicas que acotan la zona del vertido. Otras veces, se utilizan métodos de absorción de los hidrocarburos vertidos. Una vez que el crudo llega a las playas, es habitual que miles de voluntarios y de miembros de las fuerzas de seguridad trabajen retirando, manualmente, los restos de hidrocarburos que impregnan las zonas litorales. En otros casos, como actualmente está ocurriendo en el Golfo de México, se han realizado incendios controlados para eliminar parte del crudo que flota sobre las aguas.

Desde el punto de vista científico, el proyecto MAGICPAH examina la capacidad de ciertas comunidades bacterianas para facilitar la limpieza de hidrocarburos tóxicos vertidos en la naturaleza. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) son difíciles de descomponer y pueden contaminar fácilmente el suelo y otros tipos de materia. Se encuentran en cantidades muy abundantes en el fuelóleo pesado y en el petróleo crudo y representan una amenaza muy grave para la riqueza y la complejidad de la flora y la fauna marinas. Se investiga la forma de aprovechar bacterias del suelo y de entornos marinos para descomponer estos hidrocarburos en caso de contaminación.



Figura 220: Vista del carguero chino Shen Neng 1 encallado el 3 de abril de 2010 en la zona protegida de la Gran Barrera de Coral de Australia, un enclave singular de elevado valor por su biodiversidad. En ella se concentran 400 tipos de coral, 1.500 especies de peces y 4.000 variedades de moluscos. Fue declarada, por la UNESCO, Patrimonio de la Humanidad en 1981

Según las primeras investigaciones, el carguero se desvió de la ruta habitual. Vertió al mar más de dos toneladas de combustible, ocasionando una mancha de hidrocarburo de más de 3 km de largo.

Fuente: http://www.elpais.com/fotografia/sociedad/Gran/Barrera/Coral/amenazada/elpfotsoc/20100406elpepusoc_1/les/

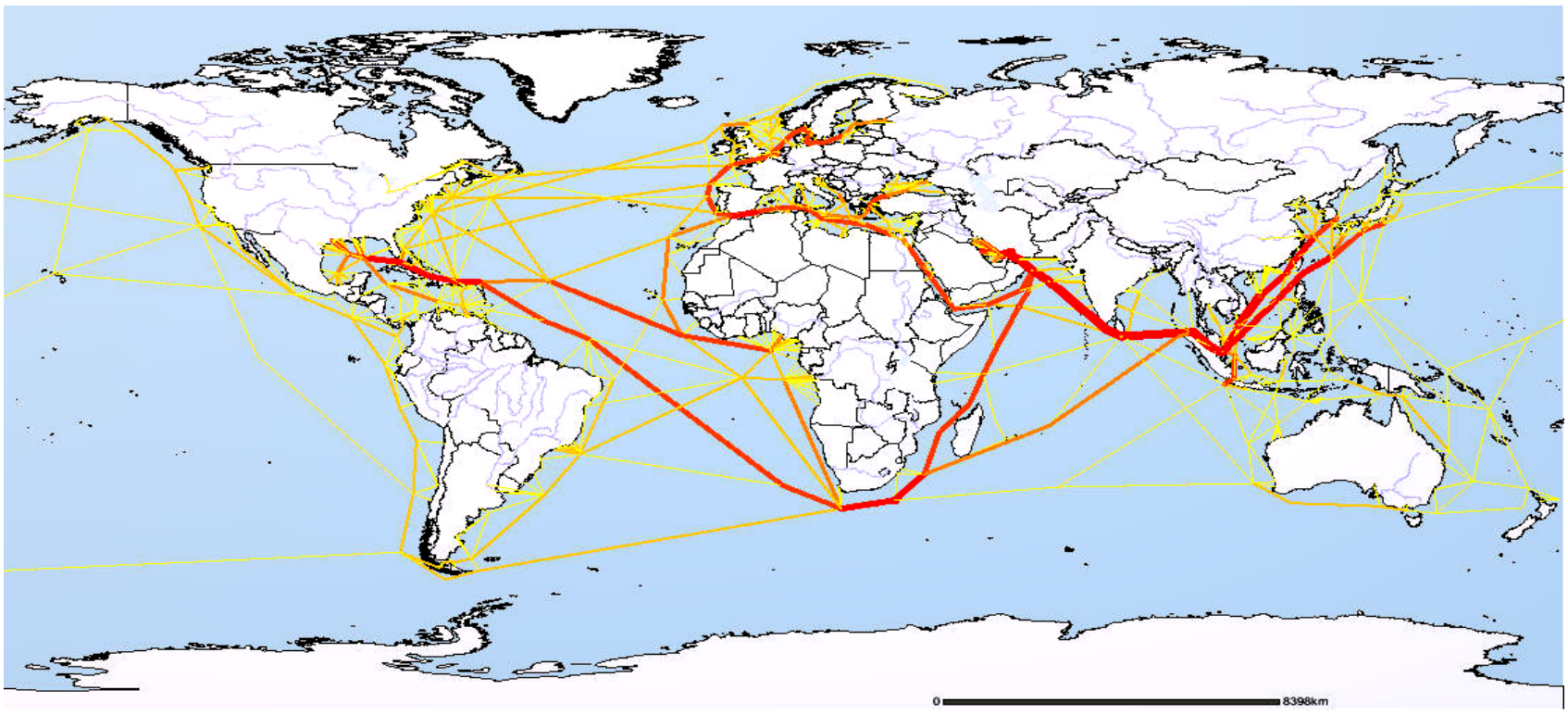
Finalmente, respecto a las consecuencias de los derrames de petróleo, Freire y Labarta (2003) clasifican en tres categorías los efectos de los vertidos sobre los organismos:

1. Los efectos letales son los producidos por el contacto directo de los organismos con el fuel, incrementándose la mortalidad por asfixia, hipotermia, impregnación e intoxicación. Estos efectos repercuten en las aves y en organismos de la zona intermareal.

2. Los efectos crónicos se producen por el contacto de los tejidos con el hidrocarburo (generalmente por ingestión), dando lugar a alteraciones genéticas, bioquímicas o fisiológicas que repercuten en funciones básicas de los organismos para asegurar su existencia y reproducción.

3. Los efectos indirectos suponen la modificación de los ecosistemas, interrumpiendo las relaciones, las cadenas tróficas y modificando el hábitat. El desfase entre la absorción de tóxicos y los procesos de depuración y metabolismo, da lugar a la acumulación de estos tóxicos en el organismo de los seres vivos.

En resumen, parece imprescindible arbitrar los controles necesarios para la navegación segura de buques que transportan hidrocarburos. Además, es prioritario establecer los mecanismos necesarios para una rápida intervención, siendo muy útil mantener operativos de vigilancia y control.



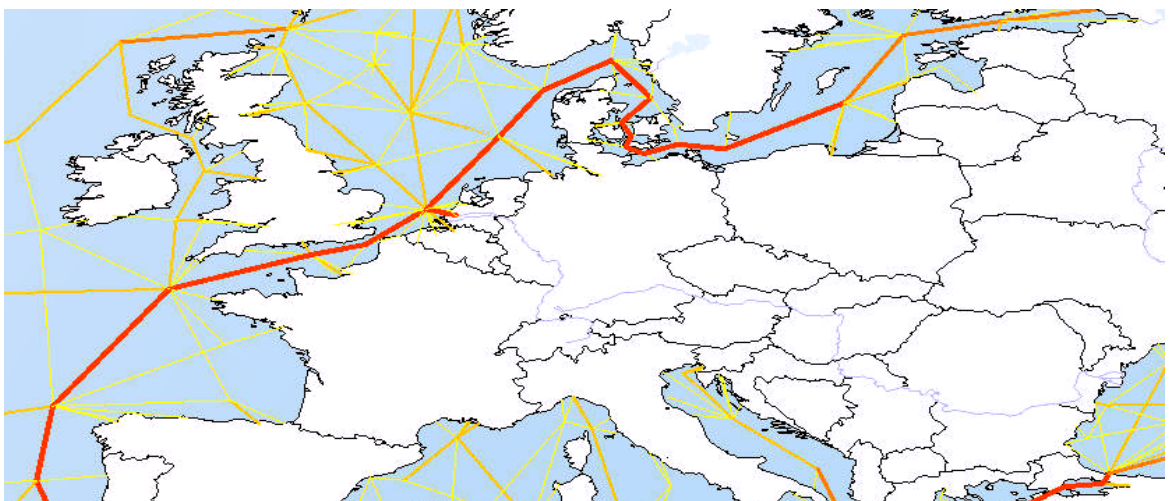


Figura 221 (arriba): Mapa de las principales rutas petroleras en el mundo, en 2005. En color rojo y trazo grueso se muestran las rutas a través de las cuales se transportan los mayores tonelajes de petróleo. Obsérvese cómo el mayor volumen de crudo se transporta desde los principales centros productores del Golfo Pérsico hasta los países más industrializados y desarrollados que demandan esta materia prima. Las principales rutas atraviesan el Océano Índico hacia el sureste asiático y hacia Sudáfrica para atravesar, después, el Océano Atlántico hacia Europa y Norteamérica.

Figura 222 (derecha): Otra de las rutas principales surca el Mar Mediterráneo y conecta con el Atlántico Norte a través del Estrecho de Gibraltar. España es uno de los países más expuestos a los vertidos de crudo. Las costas andaluzas y gallegas son zonas frecuentemente afectadas por los derrames de hidrocarburos.

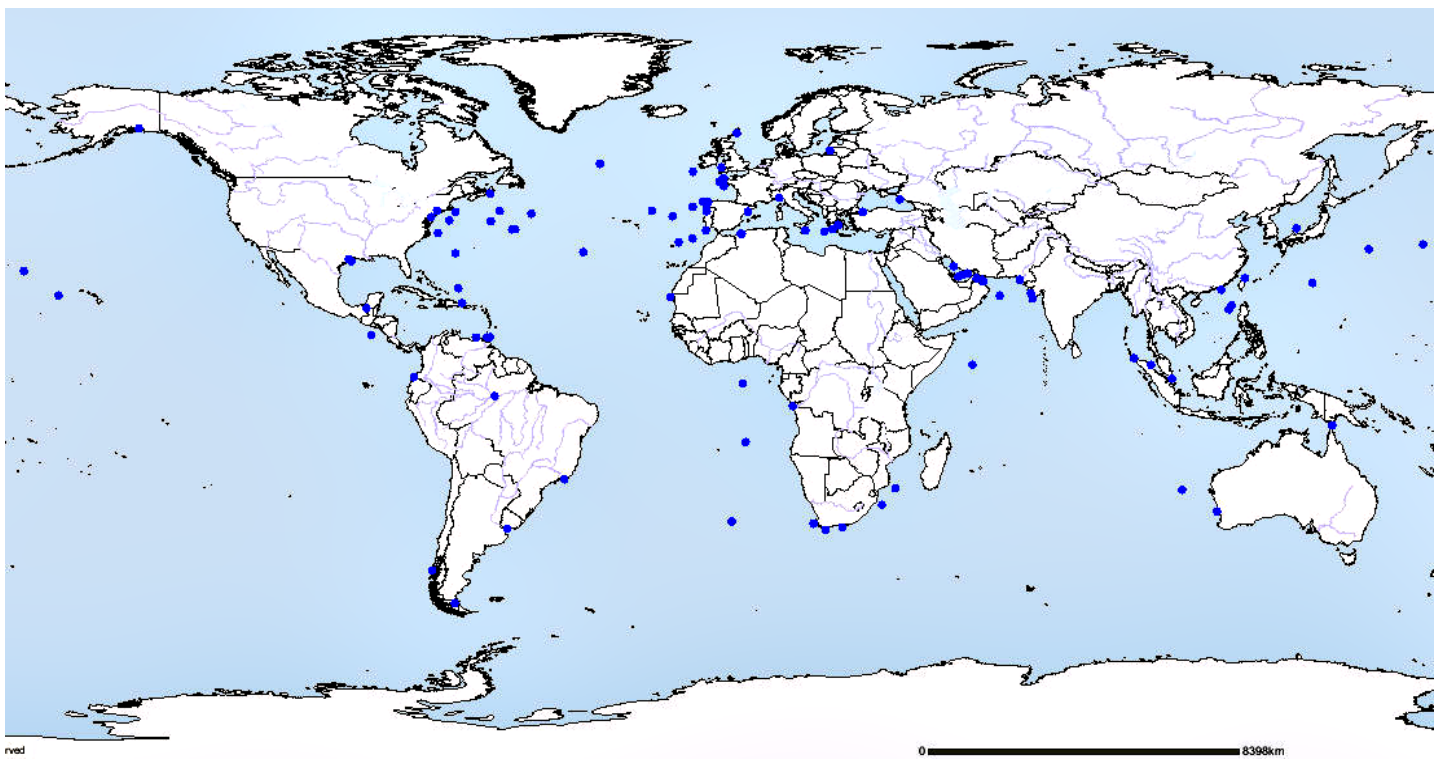


Figura 223 (abajo a la derecha): Mapa de localización de los principales accidentes (puntos azules) que han ocasionado los mayores derrames de petróleo sobre las aguas marinas desde 1967. Obsérvese la concentración de puntos en las aguas del Golfo Pérsico, del Mediterráneo y del Atlántico Norte.

Fuente: Visor de mapas: WebGIS de la organización ITOPF. http://www.itopf.com/website/ITOPFWebGIS/viewer.htm



Figura 224: Imagen radar captada, en diciembre de 1992, por el satélite ERS-1 sobre las costas de Galicia y el océano Atlántico.

El 3 de diciembre de 1992 el petrolero Mar Egeo, de doble casco, transportaba crudo desde el Mar del Norte hasta la refinería de La Coruña. En la madrugada de ese día, cuando estaba realizando la maniobra de entrada al puerto de la capital coruñesa, la visibilidad era reducida (menos de 100 m) y había vientos de más de 100 km/h. Por ese motivo, se desvió de la ruta que marcaban los prácticos del puerto y encalló. El casco del barco se partió, originando un gran incendio, visible desde la ciudad. Asimismo, se derramó gran parte de su carga, unas 80.000 toneladas de petróleo.

En el cuadrante suroeste de la imagen se aprecia la mancha de petróleo vertida por el Mar Egeo, en colores gris-verdoso y negro. Debido a que el petróleo amortigua el movimiento de las olas, la retrodifusión de radar, que depende de la agitación de la superficie del mar, refleja claramente este fenómeno. Los sensores activos han demostrado sus elevadas capacidades de detección de mareas negras como ésta.

La marea negra afectó a las rías de Ferrol, Ares, Betanzos y Coruña, de norte a sur, con graves consecuencias económicas y ambientales. Asimismo, en la imagen radar se observa, con nitidez, el relieve del territorio emergido.

Fuente: ESA



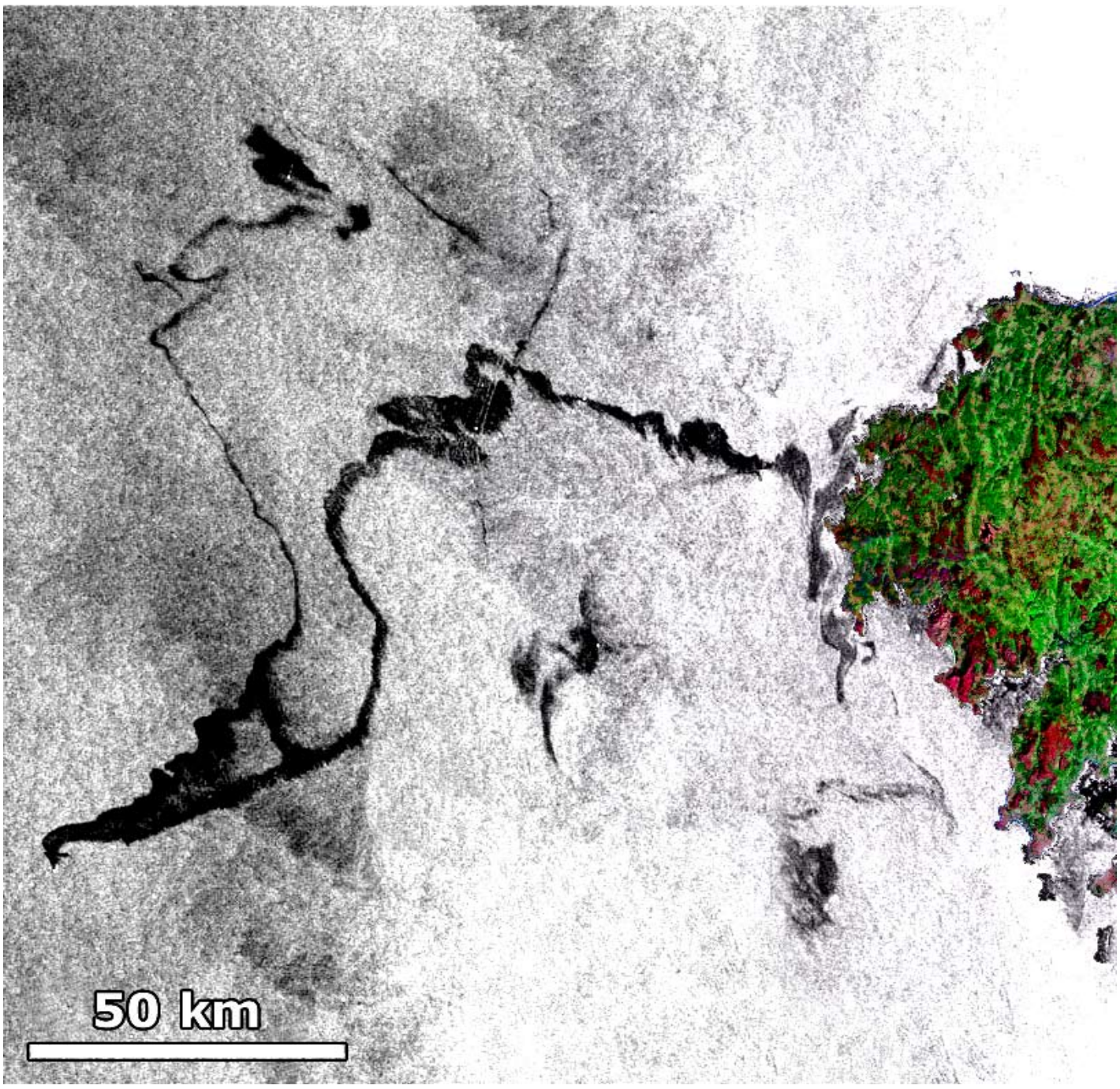






Figura 225 (arriba): Imagen radar adquirida, por el sensor ASAR del satélite ENVISAT, el 17 de noviembre de 2002 sobre las costas de Galicia (España) y sobre el océano Atlántico.

El 13 de noviembre de 2002, el Prestige, un petrolero monocasco que transportaba 77.000 toneladas de crudo desde San Petesburgo a Gibraltar, sufrió una vía de agua a 50 km de Finisterre. Emitió un SOS, intentando acercarse a la costa para refugiarse en un puerto de abrigo. Tras serle denegada la autorización y ordenársele su alejamiento de la costa, primero siguió un rumbo 330º y después navegó en dirección suroeste.

En la imagen se observa, nítidamente, la extensa mancha de petróleo (en color negro) vertida por el Prestige tras la ruptura de su casco y su hundimiento al suroeste de Finisterre.

Los daños ambientales y socioeconómicos fueron muy cuantiosos. Un gran número de voluntarios se movilizó para contribuir en las tareas de limpieza del crudo derramado que llegó a las playas gallegas. En el plano político se han conseguido algunos avances significativos, prohibiendo el tránsito de petroleros monocasco por las aguas jurisdicionales de la Unión Europea.

Fuente: ESA

Figura 226 (izquierda): El inicio y final de la línea roja muestran los lugares donde el petrolero Prestige sufrió una primera vía de agua en el casco (el punto más oriental, más cercano a la costa) y donde se produjo su hundimiento (el punto occidental, a 250 km de la costa gallega). La línea roja marca la trayectoria seguida por el barco. Además de la batimetría, sobre el mapa se ha superpuesto la mancha de crudo derramado (en color negro), dibujada sobre una imagen de satélite.

Fuente: UNEP-WCMC

Figura 227: Imagen radar adquirida, el 21 de septiembre de 2009, por el satélite alemán TerraSAR-X sobre el mar de Timor, en el norte de Australia.

En la imagen, tomada en modo ScanSAR con una resolución espacial de 18 m, se aprecia la gran mancha de petróleo (en color negro), vertido por la plataforma petrolífera Montara, ubicada en el mar de Timor, como consecuencia de una fuga. Se estima que, desde el 21 de agosto hasta principios de noviembre de 2009, vertió al mar un volumen de 2 millones de litros de petróleo, afectando a una superficie de 2.000 km².

El satélite alemán se encargó de realizar un seguimiento de la mancha de petróleo. Una vez más, los sensores activos demuestran su potencialidad para la detección de este tipo de catástrofes ambientales que causan graves daños a los ecosistemas marinos.

Fuente: DLR
http://www.dlr.de/en/Portaldata/1/Resources/raumfahrt/terrasar-x_tandem-x/australia_oil_spill.jpg







Figura 228: Imagen ASTER captada, el 10 de agosto de 2006, por el satélite TERRA sobre la costa de Beirut, Líbano y sobre el mar Mediterráneo oriental.

La ciudad de Beirut se localiza en el cabo más suroccidental de la imagen. Su extenso entramado urbano se diferencia por una textura rugosa y por el patrón geométrico que forman sus calles.

En la superficie marina se observan unas manchas alargadas de color azul oscuro que se extienden a lo largo de la costa. Se trata de una extensa lámina de petróleo derramado por la planta de Jiyyeh, situada unos 20 km al sur de Beirut. Esta planta fue el objetivo militar del conflicto con Israel entre el 13 y el 15 de julio de 2006, sufriendo daños importantes. La marea negra se extendió unos 120 km por el litoral mediterráneo.

A pesar de que este fenómeno es más perceptible en imágenes captadas por sensores activos con tecnología radar, la planitud del agua marina afectada por el petróleo frente a la rugosidad y brillo del agua no contaminada, permite observar este impacto ambiental en imágenes grabadas por un sensor pasivo, como el radiómetro ASTER.

Fuente: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

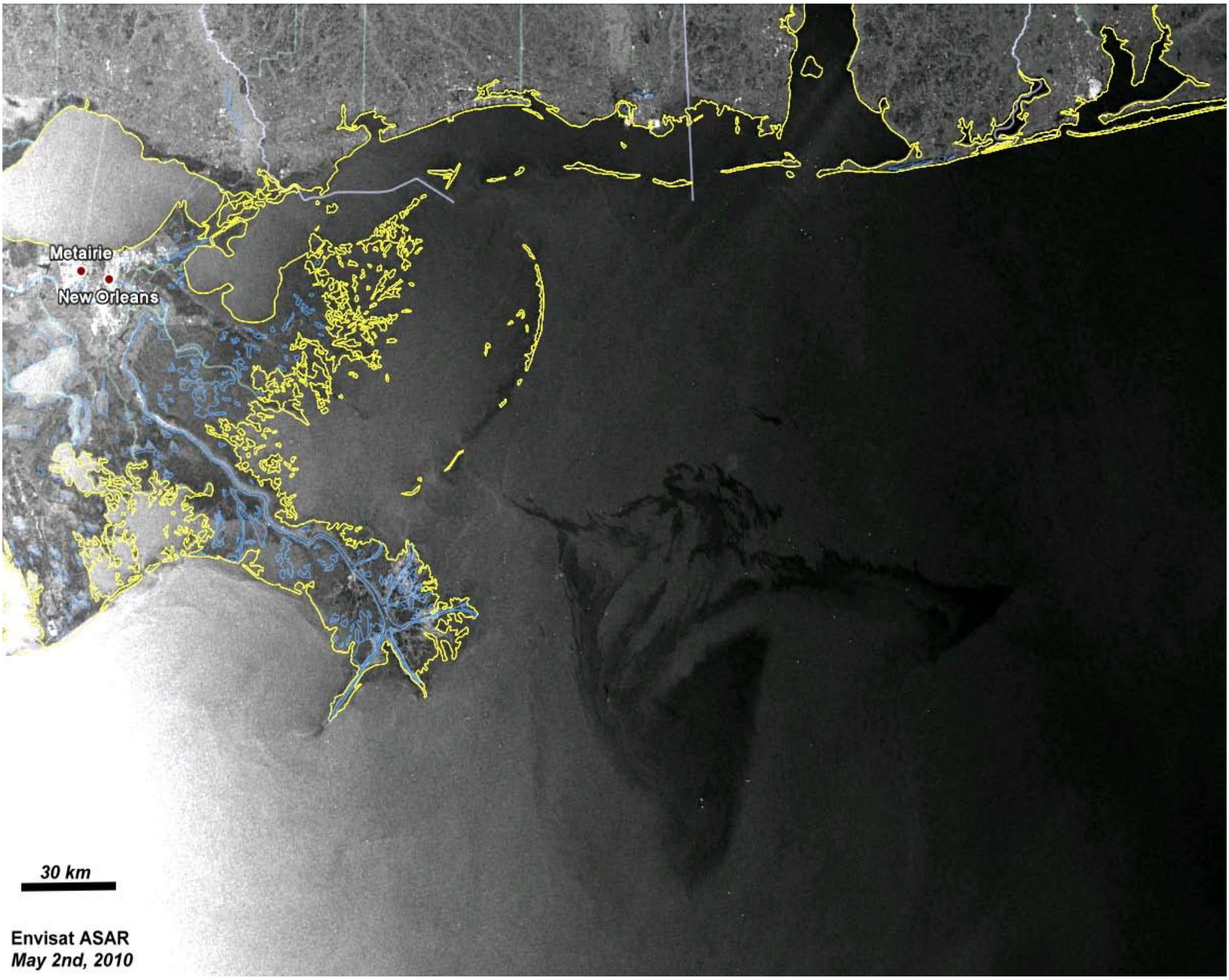




Figura 229: Imagen radar ASAR captada por el satélite Envisat el 2 de mayo de 2010 sobre el Golfo de México y la desembocadura del río Mississippi.

Sobre la imagen, en blanco y negro, se ha superpuesto digitalmente la línea de costa, en amarillo, y el cauce del río Mississippi y otras entidades hidrográficas, en azul. En el cuadrante sureste de la imagen se aprecia, en color negro intenso, la gran mancha de crudo vertido desde el pozo petrolífero en el que operaba la plataforma Deepwater Horizon el pasado 20 de abril de 2010. Se produjo una explosión en la que murieron 11 personas. Tras el incendio, se ha producido su hundimiento, a 1.500 m. de profundidad. La mancha de petróleo alcanza una superficie comprendida entre 8.000 y 10.000 km² y se espera que aún crezca más hasta que tenga éxito la operación de sellado de la plataforma mediante una gran campana que la envuelva y los submarinos robotizados consigan sellar las salidas por las que, hasta el momento de redacción de estas líneas, sigue manando el crudo.

Las costas de Louisiana son las más afectadas por esta catástrofe ambiental. El entorno del delta del río cubre una superficie de 28.568 km² y alberga una variedad y riqueza de ecosistemas, incluyendo el Parque Nacional del delta del Mississippi y el sistema de marismas que, por su continuidad espacial, es considerado el más grande de Norteamérica. Estos ecosistemas son muy vulnerables como consecuencia de su elevada diversidad biológica. Las especies de fauna y flora se enfrentarán, próximamente, a la marea negra que, según las previsiones, podría ser la peor catástrofe petrolera de todos los tiempos.

Fuente: ESA

Figura 230 (arriba): Imagen óptica captada el 2 de mayo de 2010 por el espectrómetro MERIS del satélite Envisat sobre el Golfo de México. A pesar de la densa cobertura nubosa, se aprecia el extremo oriental del delta y parte de la costa, así como la mancha de crudo, en el centro oriental de la imagen.

Las imágenes obtenidas por Envisat se están enviando a las autoridades estadounidenses inmediatamente después de su recepción, de acuerdo a la Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes. El pasado 22 de Abril, el Servicio Geológico de Estados Unidos, en nombre de la Guardia Costera, solicitó la activación de la Carta para garantizar un rápido acceso a las imágenes ópticas y radar obtenidas por los distintos satélites de Observación de la Tierra sobre la zona del vertido.

Los instrumentos MERIS y ASAR de Envisat están proporcionando datos casi en tiempo real, que están siendo utilizados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos para monitorizar la evolución del vertido. La Carta es una iniciativa de colaboración internacional entre las diferentes agencias espaciales para garantizar el acceso a los datos obtenidos por los satélites de teledetección a las agencias de protección civil y a otros organismos de respuesta rápida, con el fin de facilitar su trabajo en la mitigación de los efectos de las catástrofes naturales y antropogénicas.

Fuente: ESA



Imagen 231 (derecha): Vista del incendio ocurrido en la plataforma Deepwater Horizon.

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Deepwater_Horizon_offshore_drilling_unit_on_fire_2010.jpg

6.8. GUERRAS Y TERRORISMO

Habitualmente, además de las víctimas mortales, heridos y desplazados, las guerras implican la destrucción de objetivos estratégicos del enemigo de manera que este tipo de eventos son observables en las imágenes de satélite.

Por otra parte, el terrorismo, regional e internacional, es una lacra a la que se enfrentan, a diario, las autoridades de muchos países del mundo. En las últimas décadas, se ha convertido en un problema de índole global. Desde el punto de vista material, el alcance de sus acciones genera, desgraciadamente, impactos de gran magnitud que son registrados, desde el espacio, por los satélites de observación de la Tierra de alta y muy alta resolución espacial.

La prensa internacional relaciona, al menos, un total de 64 atentados terroristas de grandes dimensiones entre 1993 y 2008. En conjunto, han producido 5.533 muertos y 19.073 heridos. Geográficamente, ocurren en todo el mundo aunque puede decirse que hay cierta concentración en algunas zonas y ciudades. Entre ellas, pueden destacarse algunas ciudades iraquíes (Bagdad, Kerbala, Iskandariya), afganas (Kandahar, Kabul), pakistaníes (Islamabad, Lahore, Peshawar, Waziristán), indias (Bombay, Nueva Delhi, Jaipur), indonesias (Bali, Yakarta), filipinas (Manila), destinos turísticos de Sri Lanka, ciudades keniatas (Nairobi, Mombasa) y europeas (Estambul).

Por su magnitud y consecuencias, destacan cinco atentados terroristas que ocurrieron los siguientes días:

- 11 de septiembre de 2001: Dos aviones comerciales impactan contra las torres gemelas del World Trade Center de Nueva York, un tercer avión contra el Pentágono, en Washington, y un cuarto se estrella en Pensilvania, con un saldo de 2.978 muertos y más de 10 mil heridos.
- 7 de agosto de 1998: Dos coches bombas estallan cerca de las embajadas de Estados Unidos en Nairobi (Kenia) y Dar es-Salam (Tanzania), provocando 224 muertos y miles de heridos.
- 12 de octubre de 2002: un atentado con coche bomba contra una discoteca de la isla indonesia de Bali deja 202 muertos y cerca de 300 heridos.
- 11 de julio de 2006: Siete artefactos hicieron explosión en trenes de Bombay a la hora de mayor congestión, hiriendo a 300 personas y matando a más de 200.
- 11 de marzo de 2004: 191 muertos y casi dos mil heridos es el balance de las explosiones de diversas bombas en cuatro trenes ubicados en tres estaciones de Madrid.

En esta sección se han elegido unas pocas imágenes que recogen algunos de estos momentos tan dramáticos y lamentables.







Figura 232 (arriba, a la izquierda): Fragmento de una imagen IKONOS, adquirida el 20 de noviembre de 2008, sobre el Océano Índico, Somalia.

A escasas millas de la costa africana fue secuestrado 5 días antes el superpetrolero Sirius Star por los piratas somalíes que cobraron una suma estimada de 3 millones de dólares a cambio de su liberación. Fue liberado el 9 de enero de 2009. Una de las múltiples aplicaciones de las imágenes de satélite en este ámbito es la seguridad, a través del seguimiento de embarcaciones. Los servicios de seguridad están diseñados para el control de las fronteras en los lugares donde existen frecuentes desplazamientos ilegales de embarcaciones.

Fuente: http://geoeyemediaportal.s3.amazonaws.com/assets/images/gallery/news/security/hires/Somalia.jpg

Figura 233 (arriba, a la derecha): Vista del superpetrolero Sirius Star. Tiene una eslora de 332 metros y capacidad para transportar 2 millones de barriles de petróleo. En el momento de su captura realizaba una travesía desde Arabia Saudita a Estados Unidos. Hasta la fecha ha sido el barco más grande apresado por los piratas.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Sirius_Star_2008e.jpg

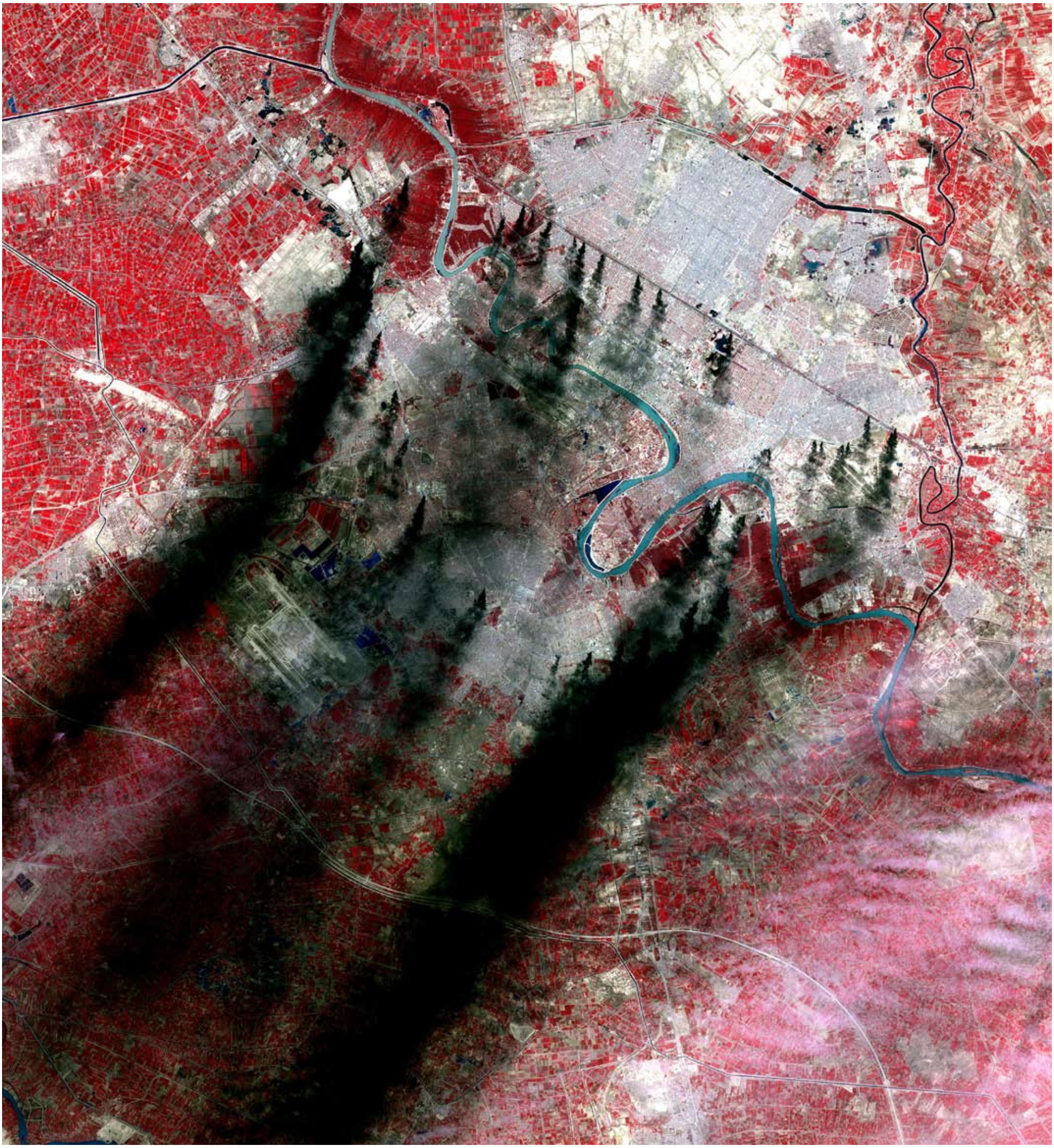




Figura 234: Imagen ASTER en falso color adquirida, el 31 de marzo de 2003, sobre la ciudad de Bagdad, Iraq.

En el cuadrante noreste de la imagen se observa esta megalópolis (en color gris-azulado y textura gruesa), la capital de Iraq, situada a orillas del río Tigris (en color azul) que recorre la imagen, desde el norte hasta el sureste, formando meandros más o menos pronunciados. Es la ciudad más poblada del país. En 2008, poseía una población de 6.431.839 habitantes.

En el momento de paso del satélite TERRA se observan las intensas y negruzcas plumas de humo ocasionadas por la rotura de los oleoductos que suministran petróleo a la ciudad, y su posterior combustión, como consecuencia de la llamada Guerra del Golfo.

Fuente: http://asterweb.jpl.nasa.gov/gallery/images/baghdad-release.jpg











Figura 235 (arriba a la izquierda): Imagen IKONOS en color natural, adquirida el 12 de septiembre de 2001 sobre el Pentágono, Washington, D.C., Estados Unidos.

En la imagen se aprecian los daños materiales ocasionados, en el ala noreste del edificio, por el impacto del avión secuestrado que realizaba el vuelo 77 de American Airlines, un Boeing 757 con 64 personas a bordo que despegó, a las 8:21 horas, del Aeropuerto Internacional Dulles de Washington DC hacia Los Ángeles.

Fuente: www.spaceimaging.com

Figura 236 (abajo a la izquierda): Vista del Pentágono, tras sufrir el impacto del avión.
Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Pentagon_on_9.11_-_2.jpg

Figura 237 (arriba a la derecha): Vista de Manhattan desde la estatua de la Libertad y del incendio de las Torres Gemelas, el 11 de septiembre de 2001.
Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/National_Park_Service_9-11_Statue_of_Liberty_and_WTC_fire.jpg

Figura 238 (abajo a la derecha): Aspecto de la llamada Zona Cero el 17 de septiembre de 2001. Vista de los escombros producidos tras el derrumbe de las Torres Gemelas del World Trade Center y de otros edificios afectados como el WTC7.
Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/September_17_2001_Ground_Zero_04.jpg





Figura 239: Imagen IKONOS en color natural, adquirida el 15 de septiembre de 2001 sobre el sur de Manhattan, en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos.

En el centro oeste de la imagen se aprecia el humo y polvo ocasionados por el incendio y derrumbe de las Torres Gemelas y de los edificios colindantes tras los atentados terroristas ocurridos cuatro días antes, el 11 de septiembre.

A las 8 de la mañana de ese día, el vuelo 11 de American Airlines, un Boeing 767 con 92 personas a bordo, despegó del Aeropuerto Internacional Logan de Boston hacia Los Ángeles. Poco después, el vuelo 175 de United Airlines, un Boeing 767 con 65 personas a bordo, partió del mismo aeropuerto con el mismo destino. Cuarenta y seis minutos después de su partida el primero de ellos se estrelló contra la torre norte y contra la torre sur, el segundo. Los aviones iban cargados con 91.000 litros de combustible. Ambos impactos ocasionaron el incendio de las dos torres y daños estructurales importantes. Además, las altas temperaturas afectaron a las estructuras de los edificios y, en menos de dos horas, se produjo su derrumbe.

Ha sido el atentado terrorista más importante ocurrido en Estados Unidos. Murieron 2.978 personas y hubo más de 10.000 heridos.

Fuente: www.spaceimaging.com

6.9. ACTIVIDADES MINERAS

La humanidad necesita una cierta cantidad de minerales y rocas para su desarrollo. Ahora bien, las actividades extractivas producen importantes impactos en el medio físico y social de su entorno. Podría decirse que la actividad minera es la actividad del sector primario que más impactos, más evidentes y más diversos genera sobre su entorno.

En 2000, los 376,5 millones de habitantes de los 15 países que configuraban la Unión Europea consumieron 11.295 millones de toneladas de rocas y minerales. Se destaca el consumo de áridos, cemento, hierro y combustibles fósiles como petróleo y carbón.

La extracción de minerales y rocas se puede realizar de forma subterránea o a cielo abierto. La minería a cielo abierto extrae, a nivel mundial, el 60 % de los materiales aunque produce mayor impacto ambiental, o al menos visual, que la extracción subterránea.

La actividad minera permite extraer las siguientes materias primas:
1. Rocas en canteras y graveras y que generalmente se utilizan en la construcción.
2. Minerales no metálicos que, igualmente, se extraen en canteras y se utilizan en la construcción.
3. Minerales metálicos que se extraen en minas subterráneas y a cielo abierto y que, generalmente, se utilizan en la industria.

La extracción de minerales no metálicos tiene menor impacto ambiental que la extracción de minerales metálicos o rocas ya que se trata de extracciones a menor escala.

Muy frecuentemente, las explotaciones mineras tienen asociadas, y situadas en sus proximidades, las instalaciones industriales que permiten el lavado y primer procesamiento y transformación de las materias primas que se extraen. Además, muchas explotaciones de minerales metálicos están cerca de una fundición para evitar el encarecimiento de los productos derivados por el transporte. Todas estas instalaciones aumentan el impacto ambiental de las explotaciones mineras.

La explotación económica de minerales y rocas debe tener en cuenta los siguientes factores:
1. Conocimiento de los recursos–reservas, es decir cantidad y calidad de la materia prima que se pretende extraer.
2. Coste de la extracción y transformación del producto. Por tanto, se tiene en cuenta: situación del mineral o roca, coste de la mano de obra, coste de la maquinaria necesaria para la extracción, coste del transporte de los minerales o rocas y coste de la propia transformación de los mismos.
3. Tecnología disponible: los costes de extracción y transformación disminuyen si mejora la tecnología.
4. Coste económico del producto, es decir, precio de mercado de la materia prima que se pretende extraer.
5. Impacto ambiental y social de la extracción.

El panorama de la minería en el mundo es diferente de acuerdo a una serie de condicionantes administrativos, legales y socioeconómicos. Las exigencias administrativas y legales en países desarrollados son mayores que en los menos desarrollados y emergentes por lo que las materias primas extraídas se encarecen en los primeros. Algunos países exigen garantías para la recuperación de los terrenos objeto de explotación. Los países menos desarrollados no poseen, por lo general, la tecnología necesaria para la extracción de minerales y rocas. En cambio sí tienen la mano de obra necesaria. Por ello, la gestión de la extracción se realiza por empresas europeas y norteamericanas.

La actividad minera podría ser la esperanza de desarrollo económico para los países menos desarrollados y emergentes pero también se puede convertir en un lastre para el mismo. Según un estudio publicado (IUCN – WWF, 1999), los países del sur ricos en recursos minerales tienden a tener tasas de crecimiento económico más lentas, niveles más bajos de bienestar social y distribuciones de ingreso mucho más asimétricas que los países en desarrollo no dependientes de minerales.

Los principales impactos ambientales de las actividades mineras son los siguientes:

1. Impactos sobre el territorio, el relieve y el paisaje:
   La actividad minera supone el cambio de uso en amplias superficies del terreno, la movilización de grandes cantidades de materiales y la formación de escombreras. La comercialización de materiales a pie de mina en Europa en 2004 ascendió a 8.000 millones de toneladas aunque el material total removido fue de 20.000 millones de toneladas. Los países desarrollados tienen una mayor proporción de terrenos perturbados por la actividad minera que los menos desarrollados aunque la tendencia está cambiando por el endurecimiento de la legislación. Los materiales de desecho que se generan en las explotaciones mineras se utilizan, en muchos casos, para rellenar los desmontes y vaciados (método de corte y relleno) por cumplir con la normativa ambiental y por reducir los costes de transporte.

2. Impactos visuales:
   Las explotaciones mineras, sobre todo a cielo abierto, son muy visibles, desde una gran distancia, por la fractura que suponen en la continuidad del paisaje. Las escombreras y desmontes también provocan una ruptura importante de las líneas que conforman el paisaje. Los materiales de desecho producidos en la explotación se pueden colocar (revegetando a la vez) de forma que se reduzca el impacto visual de la explotación. Ahora bien, las labores de recuperación no se suelen llevar a cabo a la vez que las de explotación.

3. Contaminación atmosférica y acústica:
   Las explotaciones mineras generan cierta contaminación atmosférica por el polvo generado por el uso de explosivos, por el tráfico rodado de maquinaria pesada y por los gases emanados por los motores de dicha maquinaria. Del mismo modo, estos mismos focos producen una importante contaminación acústica. La contaminación atmosférica aumenta considerablemente si las explotaciones mineras tienen asociada alguna planta de transformación industrial o una fundición que producen grandes cantidades de SO_2 y CO_2 que, junto con los óxidos de nitrógeno de la atmósfera, generan la lluvia ácida. La presencia de polvo se puede reducir mediante el regado de la explotación. La contaminación acústica se puede reducir generando pantallas con los mismos materiales de desecho que se generan en la explotación.

4. Contaminación de ríos, aguas subterráneas y zonas costeras:
   El mayor riesgo de contaminación del agua viene de las explotaciones mineras de minerales metálicos en las que, además de las menas más importantes (hierro, cobre, aluminio, cinc, níquel, plomo, etc.), pueden aparecer metales muy tóxicos (cadmio, mercurio, arsénico, etc.) si se acumulan en los seres vivos. La presencia excesiva de metales disueltos en el agua puede ser perjudicial para los ecosistemas y, en general, para la vida. El drenaje de las explotaciones mineras debe estar muy controlado para que no afecte a las corrientes superficiales y, sobre todo, para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. La minería metálica genera grandes cantidades de aguas ácidas (ácido sulfúrico, óxido de hierro, etc.) por la oxidación de minerales sulfurados en presencia de aire, agua y bacterias. Las aguas ácidas reaccionan con otros minerales y pueden producir disoluciones que contienen elementos tóxicos como cadmio, arsénico, etc. El vertido de estas aguas ácidas está completamente prohibido por su elevada toxicidad por lo que se almacenan en balsas de decantación.

5. Impactos sobre la flora, la fauna y los espacios naturales protegidos:
   La actividad minera a cielo abierto causa impactos muy negativos sobre la flora y la fauna, supone el desplazamiento de la fauna autóctona y la disminución de la capacidad fotosintética de las plantas por la sedimentación del polvo en las hojas que obstruye los estomas, impidiendo la absorción de CO_2.

6. Impactos sociales:
   Las actividades mineras tienen gran incidencia sobre las poblaciones de las zonas sobre las que se asientan a través de la creación de empleo, la generación de recursos económicos importantes, la migración de mano de obra necesaria en las explotaciones, la construcción y puesta en marcha de infraestructuras y servicios necesarios para atender a la población. Las explotaciones mineras tienen repercusiones sobre las economías locales precedentes, ya fuesen agrícolas o ganaderas. Igualmente, son importantes fuentes de empleo aunque también lo pueden ser de paro, en caso de cierre o falta de rentabilidad económica. En ocasiones, son fuente de conflicto internacional, por estar situadas en zonas fronterizas discutidas y generan conflictos entre países por la concesión y gestión de las explotaciones. Una percepción o reclamación frecuente en los países menos desarrollados es que las empresas que las gestionan se llevan todo y dejan la contaminación.

7. Impactos sobre la salud de la población cercana y sobre la salud y seguridad de los trabajadores:
   Las explotaciones mineras pueden ser causa de enfermedad en los trabajadores o en los habitantes de las poblaciones próximas por exposición a la contaminación en todas sus formas (atmosférica, acústica, etc), a tóxicos (metales), etc. La generación de polvo silíceo debe estar muy controlada ya que puede producir silicosis y otras enfermedades pulmonares. Los riesgos de accidente por explosión o derrumbes son importantes aunque las condiciones laborales en la actividad minera no son iguales en todos los países del mundo.

8. Otros posibles impactos:
   Algunos riesgos añadidos a la actividad minera son el manejo de productos químicos, de hidrocarburos, explosivos, residuos, así como la estabilidad de las paredes de las balsas de decantación, entre otros.

Algunos ejemplos más notables de estos impactos producidos, en España, por las actividades mineras son los siguientes:

1. Minas de Ríotinto-Nerva (Huelva): se ubican en el norte de la provincia de Huelva en la que, desde hace siglos, se explotan minerales y donde los impactos son muy evidentes. Los terrenos afectados por la erosión y la lluvia ácida superan los 50 km^2. El río Tinto se caracteriza por sus aguas rojas y un pH muy ácido (2-3). Lleva en disolución gran cantidad de metales pesados y contiene poco oxígeno, lo que impide el desarrollo de la vida salvo de ciertos microorganismos adaptados a estas condiciones. La NASA utiliza este entorno para diversos estudios por su posible semejanza con el ambiente de Marte.

2. Bahía de Portman (Murcia): gran cantidad de residuos procedentes de las explotaciones de la cuenca minera de Cartagena – La Unión (Murcia) fueron vertidos desde 1957 en la bahía de Portman (3000 ton/día al principio y 10.000 ton/día después) anegándola por completo con sustancias tóxicas y modificando la línea de costa.

3. Aznalcóllar (Sevilla): el día 25 de abril de 1999 se rompe la pared de la balsa de residuos (8 hm^3) de la localidad y se liberan gran cantidad de aguas ácidas y sustancias tóxicas al río Guadiamar, que desemboca en el Guadalquivir cerca del parque nacional de Doñana.

Los recursos minerales no son renovables y el crecimiento sostenible difícilmente encaja con la actividad minera que, por definición, tiene una duración limitada y finita. El reciclaje y desarrollo de nuevos materiales son alternativas que deben conducir a la reducción de las explotaciones mineras, de las materias primas obtenidas y de los impactos que producen.

Algunas explotaciones mineras están activas durante una década pero su huella en el entorno es más duradera. El objetivo de las empresas concesionarias y de las diferentes Administraciones, en su labor de control, debe ser el de minimizar todos los impactos anteriores y el de devolver las zonas explotadas a un estado lo más parecido posible a su situación previa.

Las posibilidades de recuperación del territorio que anteriormente ha sido ocupado por una explotación minera son las siguientes:

1. Restauración del ecosistema preexistente.
2. Revegetación – reconstrucción de un ecosistema alternativo que, por sucesión natural, permita la recuperación del ecosistema preexistente.
3. Reemplazamiento, mediante reforestación o repoblación, de un ecosistema diferente en el que pueden aparecer otros usos para el territorio.

La recuperación de los terrenos que, con anterioridad se han dedicado a actividades mineras, debe considerar los siguientes aspectos:

1. Revegetación, repoblación, tipo y densidad de plantas.
2. Diversidad de especies animales y vegetales a reintroducir.
3. Estructura y función del ecosistema.
4. Calidad paisajística.
5. Pendiente de las escombreras y taludes de la antigua explotación para prevenir la erosión y los deslizamientos y asegurar cierta productividad vegetal.
6. Calidad de las aguas superficiales y subterráneas.
7. Aislamiento de las balsas de decantación y de los tóxicos que pudieran contener.
8. Actuaciones sobre la población y el bienestar socio-económico.

Algunos usos potenciales de los terrenos afectados por la actividad minera son los siguientes:

1. Agropecuario y forestal. El terreno, después de una explotación minera, debe quedar apto para su explotación agrícola, ganadera o forestal según sus características. No es necesario que la actividad sea idéntica a la original.
2. Industrial. El terreno ocupado por una explotación minera puede ser utilizado de nuevo para otra actividad industrial.
3. Recreativo: laguna, campo de golf.
4. Si la explotación minera traspasa el nivel freático se generan lagunas que pueden ser aprovechadas como lugares de recreo.
5. Vertederos controlados. Los desmontes y vaciados producidos por la actividad minera se pueden rellenar con residuos urbanos.
6. Patrimonio histórico. Las antiguas instalaciones y maquinaria mineras se pueden aprovechar y conservar como muestra del patrimonio minero y de operaciones y formas de explotación tradicionales.

Figura 240: Imagen ASTER, en color natural, adquirida el 23 de abril de 2000 sobre la mina de La Escondida en el desierto de Atacama, Chile.

Se trata de una mina de grandes dimensiones, a cielo abierto, de cobre, oro y plata. Se sitúa a gran altitud (3.050 m.) y comenzó a explotarse en 1990. En 1999 produjo 827.000 toneladas de cobre, 150.000 onzas de oro y 3,5 millones de onzas de plata. Geológicamente está relacionada con la intrusión de materiales porfíricos a través del sistema de fallas del oeste de Chile.

En el centro de la imagen se observa la mina a cielo abierto, con forma circular. Al sureste de la misma, se identifican algunas balsas donde se acumulan residuos mineros. Entre las diez mayores minas de cobre del mundo, cinco se encuentran en Chile (Escondida, Codelco Norte, Collahuasi, El Teniente y Los Pelambres), dos en Indonesia, una en Estados Unidos, una en Rusia y otra en Perú (Antamina).

Cortesía de NASA GSFC, MITI, ERSDAC, JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



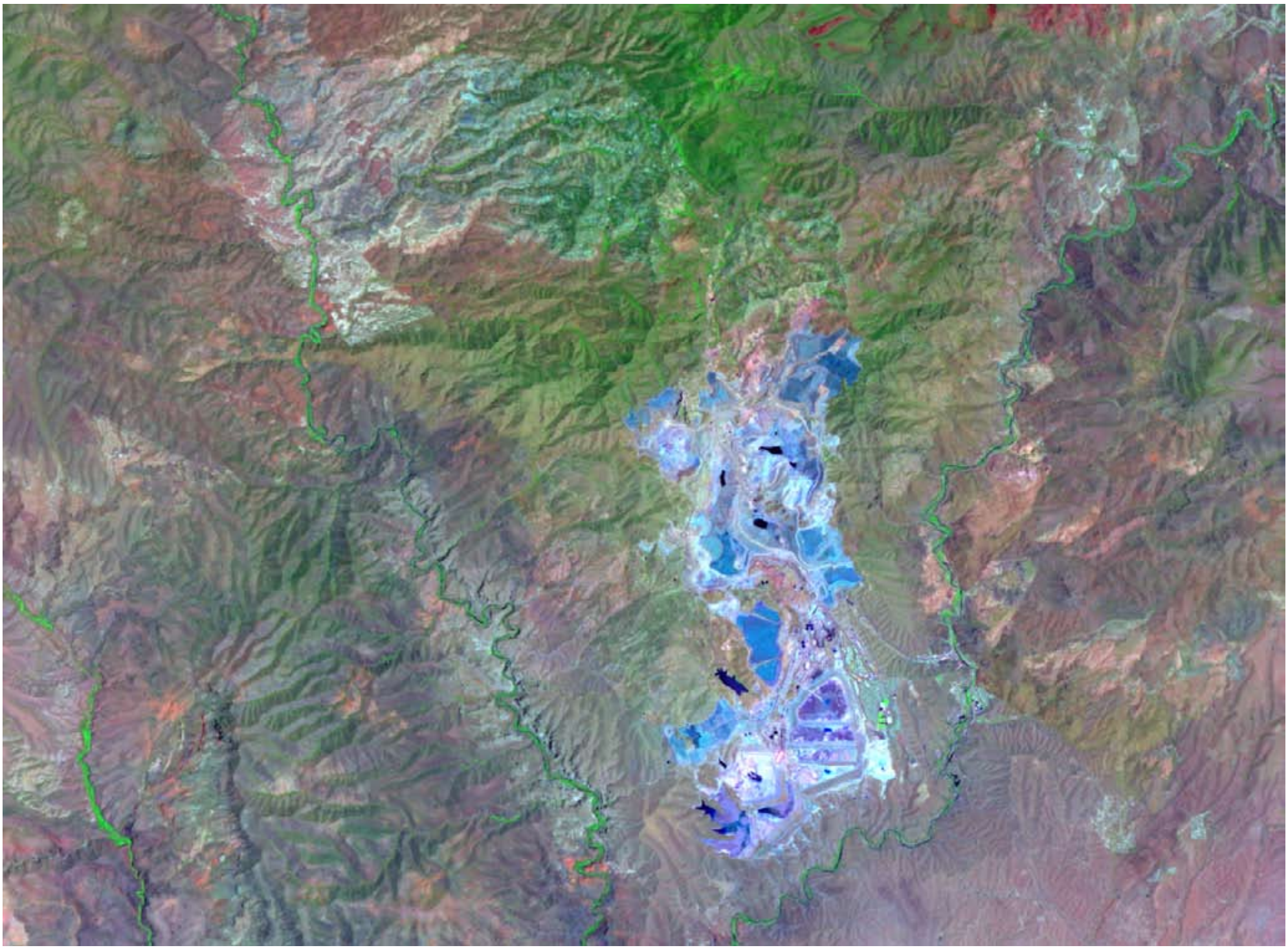




Figura 241: Imagen ASTER, en pseudo-color natural (bandas 631, RGB), captada el 14 de julio de 2007 sobre la Mina Morenci, en el sureste del estado de Arizona, Estados Unidos. La explotación afecta a un sector de la Reserva Apache de San Carlos.

Se ubica en el interfluvio, en forma de V, que forman los ríos Creek Eagle, al oeste, y San Francisco, al este, que discurren hacia el sur. En esta mina, a cielo abierto, se extraen 700.000 toneladas de minerales al año y produce cerca de 400.000 toneladas de cobre al año. Es la mina de cobre más grande de América del Norte.

Las zonas donde el mineral de cobre ha sido procesado aparecen en un color azul brillante en esta composición de color y se diferencian de los afloramientos rocosos naturales del paraje conocido como Juniper Flat, al nor-noroeste de la escena. En azul oscuro o violeta se identifican las lagunas y charcas donde se depositan las aguas utilizadas en el proceso de lavado del mineral.

Cortesía de NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.

Figura 242: Imagen ASTER, captada por el satélite TERRA el 31 de julio de 2007, sobre la mina Millennium Open Pit, en la provincia de Alberta, Canadá.

Se trata de una mina a cielo abierto para la obtención de petróleo a partir de arenas bituminosas (mezcla de alquitrán, arena, arcilla y agua). La explotación produce 260.000 barriles diarios y espera producir el doble en 2012.

En la actualidad, grandes máquinas remueven, diariamente, centenares de miles de toneladas de tierra que son transportadas en inmensos camiones hasta las zonas donde el material es apisonado. Utilizando vapor se separa la materia bituminosa de la arena. Las huellas sobre el paisaje son evidentes en esta imagen. Esta actividad minera ha transformado radicalmente los ecosistemas tradicionales de ambas riberas del río Athabasca (en el centro de la imagen): las corrientes de agua, los humedales y lagunas y el bosque boreal. Éstos han sido sustituidos por un paisaje antropizado donde alternan grandes balsas de mineral con agua (en color violeta) y las zonas excavadas.

Cortesía de Jesse Allen. NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.





Figura 243 (izquierda): Imagen ASTER, adquirida el 17 de septiembre de 2005, sobre una mina de la Compañía Jordana de Fosfatos, próxima a Al Karak, Jordania.

La minería de fosfatos y potasas es una de las principales actividades industriales de Jordania. Esta compañía, fundada en 1935, es la única operadora en ese país. Junto a los fosfatos y potasas, utilizados como fertilizantes, fabrica otros productos químicos como materias primas para la industria farmacéutica y para la elaboración de detergentes.

En la imagen se aprecian, en color blanco, las áreas donde se extraen los fosfatos.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team



Figura 244 (abajo a la izquierda): Vista oblicua, tomada el 11 de abril de 2010, sobre las graveras de Arganda, Comunidad de Madrid, España.

El crecimiento urbanístico de Madrid y de su área metropolitana ha demandado, tradicionalmente, una gran cantidad de materiales de construcción. En la llanura aluvial del río Jarama se han concentrado las empresas dedicadas a la extracción de gravas y áridos. Una vez alcanzado el nivel freático, las graveras se inundan y se abandona esta actividad minera. Ahora, estos humedales (color azul oscuro en el centro de la imagen) albergan abundantes colonias de aves.

Fuente: Alejandro Martínez de Pablos





6.10. GRANDES INFRAESTRUCTURAS

Las infraestructuras son obras, generalmente públicas, que sirven de soporte para el desarrollo de otras actividades, tanto sociales (comunicación, sanidad, alimentación) como económicas (producción de energía, etc.).

Las infraestructuras incrementan su número y tamaño a medida que aumenta el nivel de desarrollo de una sociedad. Son signo del progreso de las sociedades y del desarrollo de los pueblos, facilitan la comunicación y unión entre los pueblos, desarrollan el comercio y, por lo general, aumentan el bienestar de las personas.

Las infraestructuras tienen un coste económico elevado y, en múltiples ocasiones, generan un alto impacto social y ambiental. También pueden causar cierta fractura social, dado que hay afectados y beneficiados por la infraestructura en cuestión. Las expropiaciones y las compensaciones económicas correspondientes suelen generar conflictos sociales.

La dimensión internacional de algunas infraestructuras o las repercusiones que pudieran tener, pueden ser, igualmente, causa de conflictos internacionales que tienen su origen en el control de los recursos o el control de las comunicaciones, entre otras causas.

Existen múltiples tipos de infraestructuras. De forma resumida y sin pretender ser exhaustivos, se pueden destacar las siguientes:

1. Infraestructuras dedicadas al transporte y a las comunicaciones. A su vez, éstas pueden ser:
   - Terrestres: viarias y ferroviarias.
   - Marítimas: puertos y canales.
   - Aéreas: aeropuertos y sus terminales correspondientes.
2. Infraestructuras hidráulicas y energéticas:
   - Hidráulicas para la expansión del regadío, abastecimiento de agua a la población o para el aprovechamiento hidroeléctrico.
   - Centrales de producción energética: nucleares, térmicas, eólicas, etc.
   - Oleoductos y gasoductos.
3. Grandes desarrollos urbanísticos y de los servicios que requieren.
4. Otras infraestructuras: sanitarias, telecomunicaciones, etc.

Algunas de estas infraestructuras, por su envergadura, como por ejemplo los grandes embalses, tienen grandes repercusiones sociales y ambientales, que incluso pueden ir más allá de las fronteras de un país.

Frente a éstas, las infraestructuras de menor envergadura, como por ejemplo una depuradora, suelen tener repercusiones a nivel local o regional.

Unas y otras pueden ser detectadas desde el espacio por los satélites de observación de la Tierra. Las primeras son identificadas desde satélites de alta y media resolución espacial, dadas sus grandes dimensiones, mientras que las segundas son percibidas, con gran detalle, desde las plataformas y sensores de alta y muy alta resolución espacial. A continuación, se muestra una breve selección de infraestructuras vistas desde el espacio.



Figura 245 (izquierda, página anterior): Imagen QuickBird, en color natural, adquirida el 21 de abril de 2002 sobre la presa de las Tres Gargantas, Yichang, China.

Se aprecia el detalle de las obras de esta gran infraestructura hidráulica y la envergadura de la presa.

Fuente: www.digitalglobe.com



Figura 246 (arriba a la derecha): Fragmento de una imagen ASTER, adquirida el 17 de julio de 2000 sobre la presa de las Tres Gargantas, Yichang, China.

En la imagen se aprecia, en color blanco-azulado, la construcción del muro de la presa y de las infraestructuras complementarias. Regula las aguas del río Yangtsé y permite almacenar 39.000 Hm^3 de agua. Ocupa una superficie inundable de más de 600 Km de longitud.

Fuente: Cortesía de Jesse Allen, Earth Observatory, usando datos ASTER: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.



Figura 247 (abajo a la derecha): Fragmento de una escena ASTER adquirida el 14 de mayo de 2006 sobre la misma zona.

En la imagen inferior se observa cómo la presa atraviesa el río completamente y forma un extenso lago, en el noroeste de la imagen, aguas arriba del dique. Tan sólo ha quedado un estrecho by-pass, al norte de la presa, para el tránsito de los barcos. La ejecución de la infraestructura ha supuesto impactos sociales. Los más importantes son la reubicación de casi un millón de personas, la desaparición de 13 ciudades, de cientos de pueblos y de importantes muestras del patrimonio histórico y arqueológico. Los impactos ambientales son diversos: alteración de los ecosistemas, incremento de la contaminación, aumento del riesgo sísmico y alteraciones sedimentarias y de salinidad en el estuario del río.

La presa se ha terminado en 2006 aunque las infraestructuras hidroeléctricas anejas han concluido en 2009. Cuando esté a pleno rendimiento esta central podrá producir un 10 % de la electricidad que consume el país. Las 26 turbinas de que consta el proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico forman la central más grande del mundo y permitirán la producción de 85.000 millones de kWh al año. Además del almacenamiento de agua para el consumo humano y el regadío y el aprovechamiento hidroeléctrico, la presa está concebida para mejorar las comunicaciones ya que el río mejorará sus condiciones de navegabilidad y también se concibe como forma de regular los caudales que durante el siglo XX han provocado grandes inundaciones y la muerte de unas 300.000 personas, de las cuales 4.000 murieron en 1998.

Fuente: Cortesía de Jesse Allen, Earth Observatory, usando datos ASTER: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.



Figura 248: Imagen Landsat-5 TM, adquirida el 23 de agosto de 1993, sobre el embalse de Atatürk, Turquía.

El embalse de Atatürk, en el cuadrante noroeste de la imagen, en color negro, está situado en el centro de Turquía, sobre el cauce del río Eúfrates que, junto con el Tigris, riega el Creciente Fértil donde se desarrolló la cultura de Mesopotamia en la que, por primera vez, el hombre forma parte de una sociedad más compleja y en la que se desarrolla la agricultura y el regadío. La regulación de los ríos Eúfrates y Tigris está justificada ya que tienen caudales muy irregulares, generan inundaciones en invierno y, por el contrario, padecen estiajes en verano. La presa permite almacenar 48,7 Km^3 de agua y ocupa una superficie inundable de 817 km^2. El embalse forma parte del proyecto Anatolia que persigue el incremento de la superficie agrícola (casi 2 millones de hectáreas) de Turquía, sobre todo en la zona conocida como llanuras Harran (en el sureste de la imagen, formando un puzzle de tonos ocres y verdes), además del aprovechamiento hidroeléctrico (8.900 GWh al año), el desarrollo de la pesca y la promoción de las actividades recreativas y deportivas.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/HarranPlains/Images/ataturk_1993.jpg

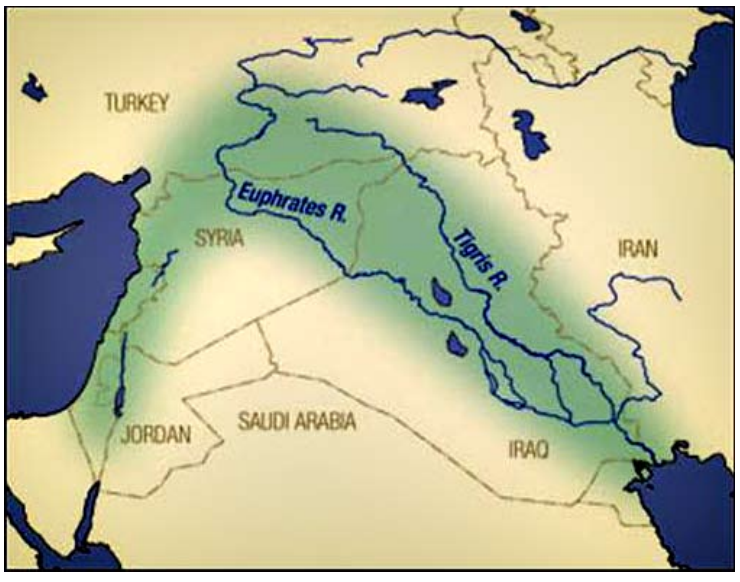


Figura 249 (derecha): Mapa de situación
Fuente: Robert Simmon

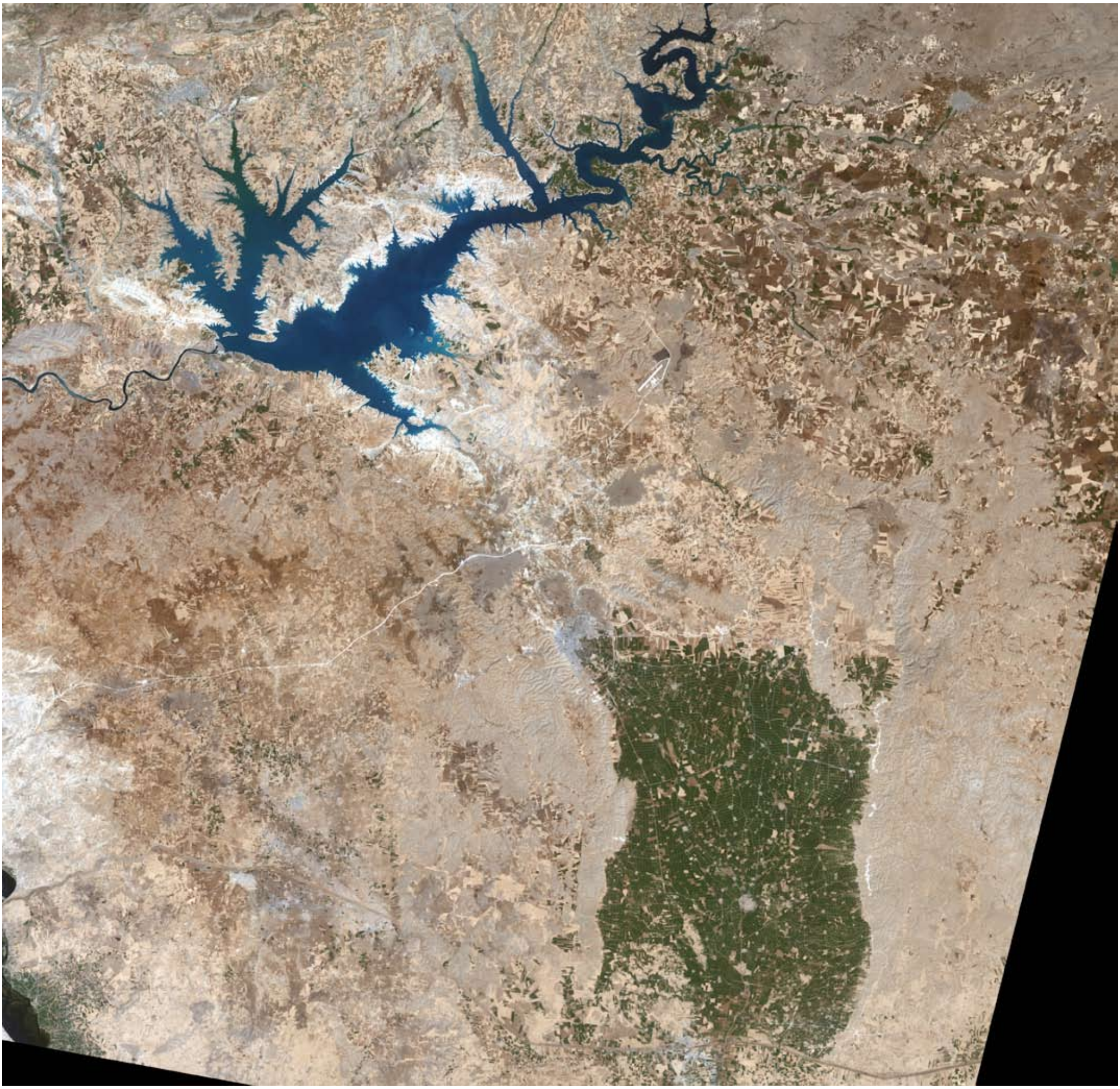




Figura 250: Imagen Landsat-7 ETM, adquirida el 24 de agosto de 2002, sobre el embalse de Atatürk, Turquía.

El proyecto de ampliación de los regadíos se inicia en 1983 y la presa de Atatürk se inaugura en 1992. Diez años después, las llanuras de Harran están dedicadas completamente a los cultivos de regadío. Obsérvese la mancha verde del sureste de la imagen y compárese con esa misma zona en la imagen de la página anterior. La ampliación del regadío de las llanuras Harran ha supuesto el aumento de la producción de algodón desde 164.000 hata 400.000 toneladas en el año 2001.

Por otra parte, es un claro ejemplo de utilización geopolítica de los recursos hídricos en una zona bastante conflictiva. Turquía interrumpe el caudal del Eúfrates, en 1990, por las obras que se realizan en la presa de Atatürk lo que supone la denuncia de Siria e Irak. El asunto llega, incluso, a las Naciones Unidas en 1991 donde se debate si la presa pudiera ser utilizada por Turquía para limitar los caudales del Eúfrates. A mediados de los años 90, el presidente turco Turgut Ozal vuelve a utilizar el caudal de este río como "arma" contra Siria por su apoyo a los independentistas kurdos.

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/HarranPlains/Images/ataturk_2002.jpg

Figura 251: Imagen pancromática, adquirida el 18 de agosto de 2009 por el satélite WorldView-1, sobre la presa Hoover, en la frontera de los estados de Nevada y Arizona, Estados Unidos.

En el centro de la imagen se observa, nítidamente en color blanco-grisáceo, la presa de hormigón, del tipo de bóveda de gravedad, construida, entre 1931 y 1936. Está encajada en un cañón y apoyada en las paredes rocosas del mismo. El objetivo era regular las aguas del río Colorado para evitar inundaciones en las tierras bajas cuando se producía el deshielo de las Rocosas. Adicionalmente, el agua almacenada podría sustentar una próspera agricultura de regadío aguas abajo, en una zona más árida, y abastecer a la ciudad de Los Ángeles.

La presa se encuentra a 48 Km, al sureste de Las Vegas. Represa las aguas del río Colorado originando, hacia el norte, un gran embalse (en color negro) conocido con el nombre de Lago Mead, en honor a Elwood Mead, ingeniero estadounidense que dirigió, por esa época, el Bureau of Reclamation o departamento encargado de los proyectos hidráulicos. En la actualidad, este lago, que mide cerca de 100 km de longitud, está catalogado como Área Recreativa de ámbito nacional.

En primer plano de la imagen también se observa la construcción de un nuevo puente y de una nueva carretera que sustituirá el difícil y peligroso tramo de la actual carretera interestatal 93 que serpentea por las laderas del cañón y pasa por encima del muro de la presa.

Fuente: http://www.digitalglobe.com/downloads/featured_images/nevada_hooverdam_wv1_aug18_2009_dgl.jpg



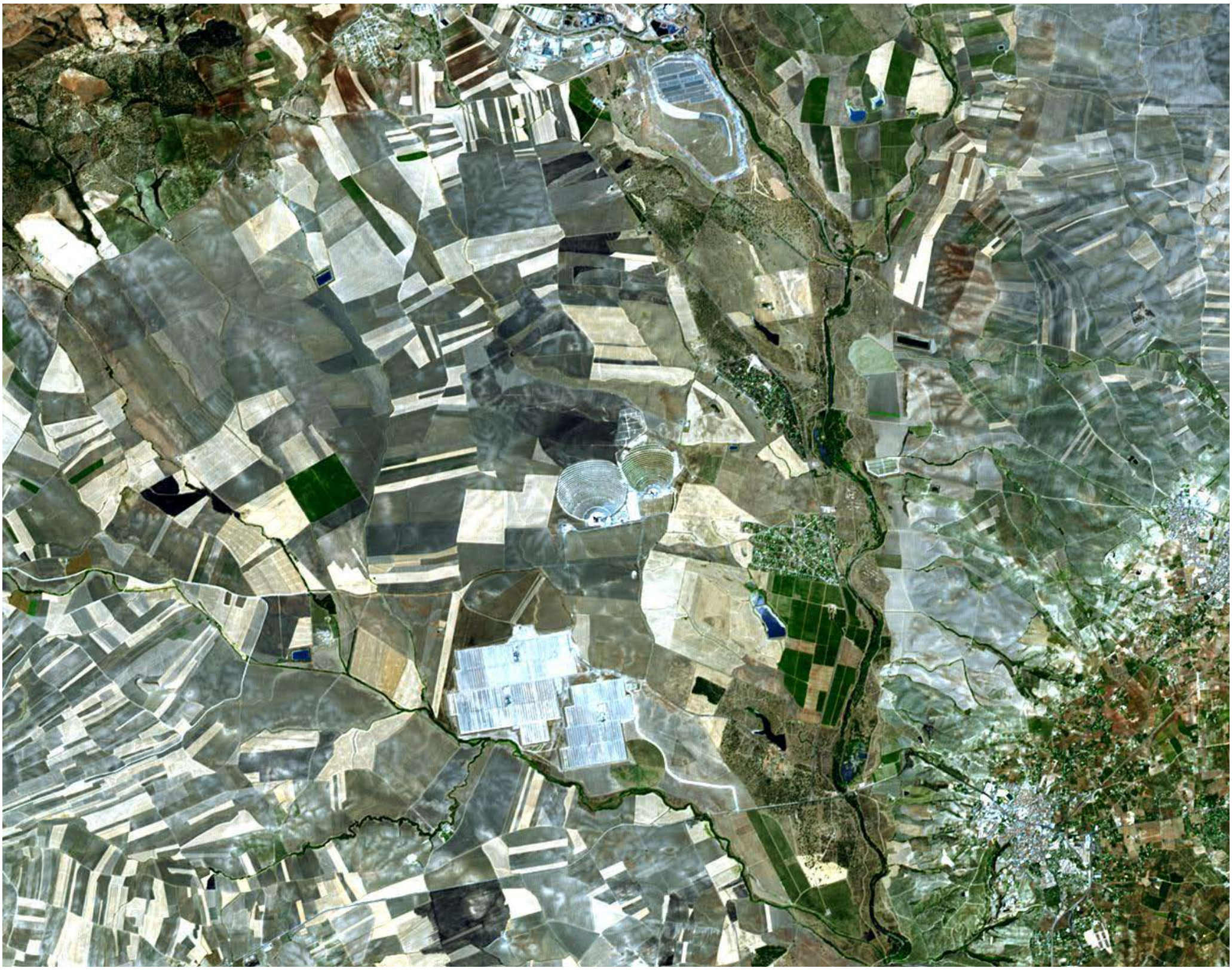


Figura 252: Imagen ASTER , en color natural, captada desde el satélite TERRA sobre la torre de energía solar llamada PS20 en Sanlúcar la Mayor, Sevilla, España.

La torre de energía solar PS20 es la más grande del mundo. Empezó a funcionar, recientemente, en Sevilla. Se observa en el centro de la imagen y puede percibirse, incluso, la sombra que proyecta esta infraestructura energética. En el este, a su lado, puede verse también su hermana pequeña, la torre solar PS10.



La nueva central solar PS20, construida por Abener y con 20 megavatios de potencia, el doble que la PS10, producirá energía renovable suficiente para abastecer a 10.000 hogares y evitará la emisión a la atmósfera de unas 12.000 toneladas de CO_2. PS20 está formada por un campo solar de 1.255 helióstatos, diseñados por una empresa española, Abengoa Solar. Cada helióstato, de 120 metros cuadrados de superficie, refleja la radiación solar que reciben sobre el receptor situado en la torre de 165 metros de altura produciendo el vapor que permite la generación de electricidad en la turbina.

Algo más del 38% de la energía producida en España, en 2009, procede de energías renovables, destacando, entre otras, la energía solar. La elevada radiación solar que reciben los territorios del centro y sur de la península constituye un potencial energético de gran interés. Nuestro país espera superar, en 2,7 puntos, el objetivo, fijado por la UE, de que el 20% del consumo final bruto de energía proceda, en 2020, de las energías renovables.

Según un informe de Greenpeace sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular con un horizonte en 2050 bajo un escenario conservador, nuestro país dispone de una gran capacidad de generación de energía con tecnologías renovables. En 2050 esta capacidad equivaldrá a 56 veces la demanda eléctrica peninsular y a 10 veces la demanda total de energía.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS
y U.S./Japan ASTER Science Team





Figura 253: Imagen tomada, en color natural, el 30 de enero de 2003 por los astronautas de la Estación Espacial Internacional.

El canal de Panamá une los océanos Atlántico y Pacífico en Centroamérica y facilita las comunicaciones marítimas entre ambas costas de América y entre este continente y la zona de Asia–Pacífico. Su construcción se inicia en 1904, poco después de la independencia de Panamá. Se inaugura oficialmente el 15 de agosto de 1914. El canal tiene 81 km de largo, entre 90 y 300 m de ancho y entre 12,8 y 13,7 m de calado. Consta de tres conjuntos de esclusas gemelas (Miraflores, Gatún y Pedro Miguel) y uno de los mayores lagos artificiales del mundo, el lago Gatún que tiene una superficie de 425 km^2. El volumen de materiales excavados asciende a 183 millones de m^3.

Los antecedentes del proyecto se remontan a la época del descubrimiento de América. En numerosas ocasiones hubo intentos de poner en comunicación ambos océanos. El constructor del canal de Suez también afronta el proyecto aunque no consigue terminarlo. A mediados del siglo XIX, en 1850, se traza y construye un ferrocarril que une los océanos Atlántico y Pacífico, obra precursora del canal de navegación.

EE.UU. termina el proyecto y Panamá concede la administración del canal a los estadounidenses desde su inauguración a cambio de una renta anual hasta que, en 1977, se firma el tratado "Torrijos – Carter" que devuelve el control del canal a Panamá, a partir del 1 de enero de 2000.

Las nuevas exigencias comerciales han supuesto el proyecto de ampliación del canal de Panamá (construcción de una tercera línea de esclusas que permita la entrada de barcos con más de 18 m de calado) que comenzó en septiembre de 2007 y terminará en 2014 (celebración del primer centenario de la infraestructura). Este proyecto se ha adjudicado a un consorcio liderado por una empresa española. Los posibles impactos sociales y medioambientales del canal se están estudiando y analizando (alteración de ecosistemas, bosques y reservas, afección a comunidades indígenas, desaparición de patrimonio cultural, etc) aunque se cree que se pueden disminuir con los procedimientos y tecnología existentes en la actualidad.

En el centro de la imagen se observa la forma lineal del canal y, en color negro, las extensas masas de agua formada por los lagos artificiales. En el norte se identifica claramente el lago Gatún. Las copiosas lluvias tropicales de la zona aseguran el llenado de estos lagos. Por otra parte, en torno al canal se aprecia una franja de bosque tropical, en color verde, que está protegida para que el bosque controle la erosión.

Fuente: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory at Johnson Space Center.

Figura 254: Fragmento de una imagen adquirida, por el espectro-radiómetro MISR, el 30 de enero de 2001 sobre el canal de Suez, Egipto.

El canal de Suez une el mar Mediterráneo con el mar Rojo y facilita las comunicaciones marítimas entre Europa y Oriente Medio y la zona de Asia - Pacífico. Gran parte del comercio de petróleo mundial, sobre todo aquel que tiene como destino Europa, se hace a través del canal de Suez.

El canal se construye durante el siglo XIX por empresas francesas encabezadas por Fernando de Lesseps, con la autorización de Egipto. La construcción se inicia el 25 de abril de 1859 y se inaugura oficialmente el 17 de noviembre de 1869 aunque el primer barco atraviesa el canal el día 17 de febrero de 1867. Tiene 174 km de largo, entre 280 y 345 m de ancho y 22´5 m de calado.

Las obras se inician sin maquinaria, aunque la envergadura de la infraestructura hace que se use tecnología completamente novedosa en el mundo. El trabajo se aceleró con la introducción de las dragas de cangilones que en los dos últimos años permiten excavar más de 50 millones de metros cúbicos de los 75 millones del conjunto de la obra.

El Tratado de Constantinopla de 1888 dice que el canal es zona neutral bajo protección británica por lo que se permite la navegación internacional de forma libre. Sin embargo, el presidente egipcio Nasser, en 1956, intenta nacionalizar el canal para financiar la construcción de la presa de Asuán lo que supone la denuncia de Francia, Inglaterra e Israel y su clausura temporal.

La ONU interviene, en 1957, reabriendo el canal y concediendo la administración del canal a Egipto aunque se vuelve a cerrar una década después durante el conflicto árabe – israelí y la Guerra de los Seis Días.

En el centro de la imagen es claramente visible el canal que une el Golfo de Suez, al sur, con el Mar Mediterráneo, al norte. El golfo de Suez es el brazo noroeste del Mar Rojo. Se distingue la forma lineal, muy geométrica, del canal que contrasta con la superficie muy reflectiva de las arenas del sur del delta del Nilo y de la península del Sinaí, al este del Mar Rojo.

Al noroeste de la imagen se evidencian las fértiles tierras del delta del Nilo, en color verde. En la esquina de la imagen se observa la desembocadura del brazo derecho del Nilo, el conocido con el nombre de Damietta.

Fuente: NASA/GSFC/JPL, MISR Team.





Figura 255 (abajo): Fragmento de una escena ASTER, en falso color convencional, adquirida el 5 de julio de 2000 sobre el aeropuerto de Barajas en Madrid, España.

El aeropuerto de Barajas, hasta el año 1998, tenía 2 pistas entrecruzadas en forma de X, como puede apreciarse en el centro de la imagen inferior. Podía soportar unos 50 movimientos / hora. El proyecto de ampliación del aeropuerto responde a la necesidad de dar respuesta al aumento del tráfico aéreo y al crecimiento, cada año, del volumen de pasajeros. El número de pasajeros de Barajas en el año 2000 fue de 27 millones. Tras las obras de ampliación, esta infraestructura aeroportuaria permite acoger a 50 millones de pasajeros, anualmente.

En la parte norte de la imagen inferior se aprecia una gran mancha blanca, de forma rectangular, que se corresponde con la explanada en la que, recientemente, se han movido las tierras para iniciar la construcción del nuevo edificio que albergaría, posteriormente, la nueva terminal del aeropuerto, la denominada T4. Adosada a esta explanada, hacia el este, ya se perciben las nuevas pistas, en forma lineal y de color negro.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 256 (página siguiente, arriba): Escena, en color natural sintético, captada el 29 de enero de 2010 por el satélite español DEIMOS sobre el aeropuerto de Barajas, en Madrid, España.

En la actualidad, el aeropuerto dispone de 4 pistas independientes en forma de chevrones paralelos, como puede observarse en el centro-oeste de la imagen. Ahora, puede soportar entre 100 y 120 movimientos / hora. La ampliación de Barajas permite a la capital de España conservar la hegemonía de las comunicaciones aéreas entre Europa y Sudamérica.

El aeropuerto de Barajas está situado a tan sólo 10 km al este de Madrid. Está bien comunicado con la capital por autobús, metro y por una densa red de autopistas que, además, le conectan con otras ciudades del área metropolitana de Madrid. Como se ve en la imagen está rodeado por un anillo de autopistas: la R2, por el norte, la M50 por el este y la A2 por el sur.

Los impactos de una infraestructura de esta envergadura son muy notables. Los más importantes son los siguientes: entre los positivos, la ampliación del aeropuerto ha supuesto la creación de numerosos puestos de trabajo, el desarrollo económico y comercial y la mejora de las comunicaciones. Las estadísticas indican que uno de cada cinco empleos de la Comunidad de Madrid está relacionado directa o indirectamente con el aeropuerto. Entre los impactos negativos, el incremento del tráfico aéreo ha supuesto la extensión de la huella sonora y la degradación del entorno. Las operaciones aeroportuarias aumentan el nivel de ruido que soportan más de 100.000 personas por encima de los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Desde el punto de vista ambiental, la construcción de una de las pistas ha supuesto el desvío del río Jarama en un tramo de 1.700 m.

En la imagen se aprecia, también, otra infraestructura curiosa. En el este de la imagen se diferencia una forma circular dentro de una mancha oscura de forma casi triangular. Se trata de las instalaciones que el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) tiene en la localidad madrileña de Torrejón de Ardoz. La forma circular se corresponde con una pista donde se prueban vehículos para su homologación.

Fuente: http://www.deimos-imaging.com/imagenes-deimos-1

Figura 257 (página siguiente, abajo a la izquierda): Vista de la singular estructura de la cubierta de la terminal T4 del aeropuerto de Barajas.

Figura 258 (página siguiente, abajo a la derecha): Vista de las pistas de la terminal T4 y de la torre de control del aeropuerto de Barajas.

Fuente: Susana de Pablos

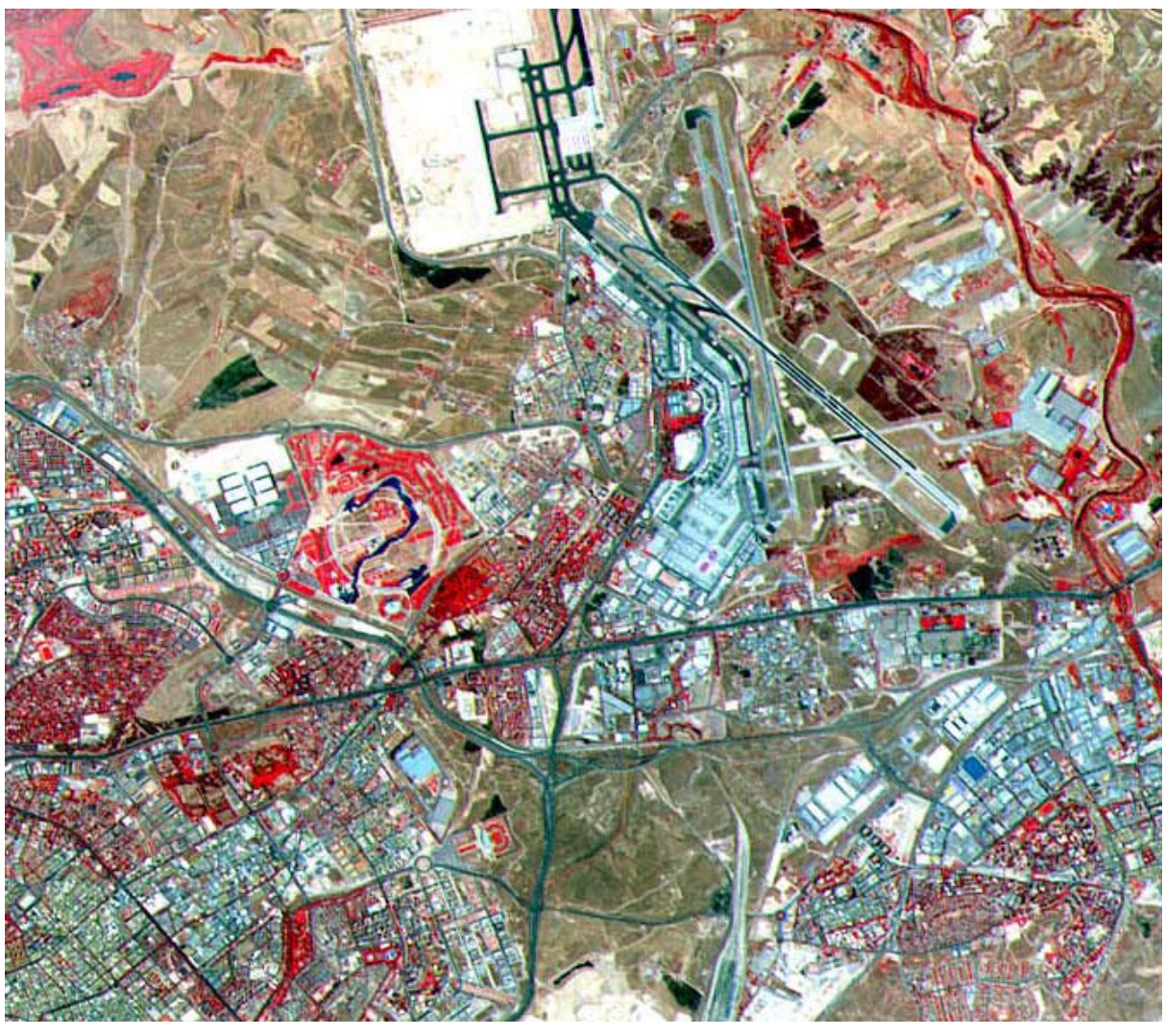












Figura 259 (página anterior): Imagen ASTER en color natural, adquirida el 18 de septiembre de 2006 desde la plataforma TERRA, sobre los nuevos proyectos urbanísticos de Dubai y las nuevas áreas de ocio y recreativas en las islas artificiales con forma de palmera, Emiratos Árabes Unidos.

La ciudad de Dubai pertenece al emirato del mismo nombre que se encuentra en los Emiratos Árabes Unidos y se ha convertido, en los últimos años, en un símbolo del hiper-desarrollo económico, de la inversión, del gasto, de la opulencia. Prácticamente todos los años se establecía algún record como el edificio más alto del planeta, el hotel más lujoso del mundo, la mayor concentración de grúas u otros similares.

Algunos de los símbolos más representativos de esta situación son el proyecto "Islas Palmera" y el proyecto "Islas del Mundo" que son dos infraestructuras inmobiliarias de gran envergadura y que, por tanto, tienen grandes impactos sobre el territorio. Estos proyectos se enmarcan en un programa de diversificación de las actividades económicas que sustentan el país. La economía de Dubai depende, fundamentalmente, del petróleo y, en estos momentos, trata de hacerse un lugar en el turismo internacional, sobre todo de lujo, así como en los sectores de la inversión inmobiliaria y del comercio.

El proyecto de las Islas Palmera consta de 3 palmeras. Dos de ellas ya están ejecutadas (Jumeirah, en el centro-sur de la imagen, y Jabel Ali, la más meridional) y otra (Deira) que aún no se ha comenzado. Su construcción es incipiente y se intuye en el norte de la costa, al noroeste del aeropuerto de Dubai. La tercera palmera tendrá una superficie de más de 46 km^2.

En conjunto, esta actuación urbanística supone el aumento de las playas del emirato en más de 500 km. Las obras se iniciaron en 2001 y 2002, respectivamente. Tienen una superficie de 5,6 y 8,4 km^2, respectivamente, y podrán albergar unas 10.000 residencias además de centros comerciales, hoteles, etc. Las palmeras ejecutadas han supuesto la remoción de 100 millones de m^3 de arena y roca y la que falta por ejecutar removerá 10 veces más de materiales que las anteriores.

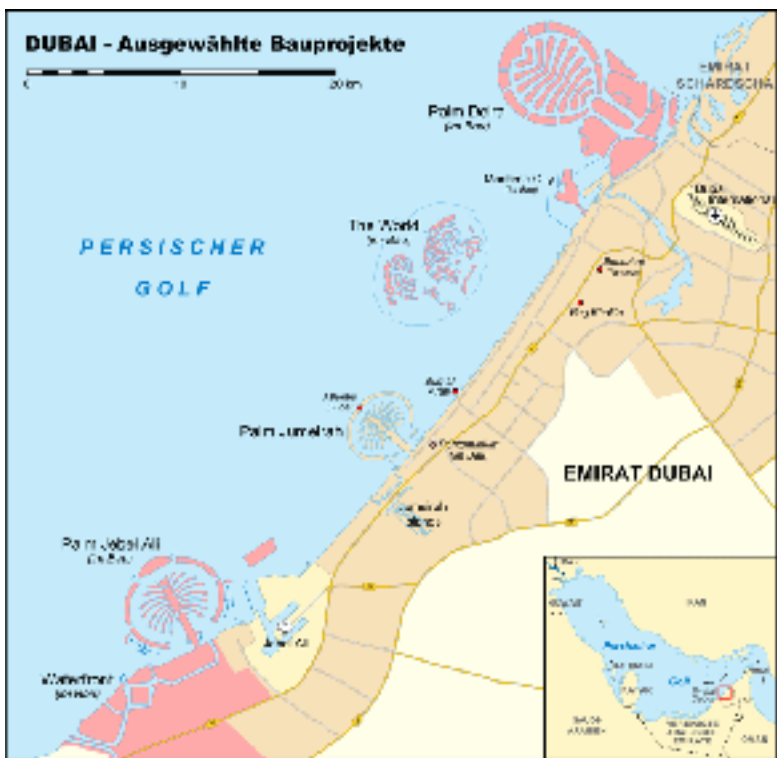
El proyecto Islas del Mundo, en el centro de la imagen, es un conjunto de unas 300 islas que se disponen como un mapamundi y que albergarán otras tantas residencias de lujo. El proyecto tiene una superficie total de casi 10 km^2 y supone el aumento de las playas del emirato en otros 230 km, aproximadamente.

Estas actuaciones urbanísticas han ocasionado diversos impactos, tanto por la ejecución de las obras como por el aumento de población que se pretende en un entorno desértico. Entre otros impactos se señalan los siguientes: alteración de la línea de costa del Golfo Pérsico y de su estética, lo que tiene consecuencias en las corrientes marinas, la sedimentación en la zona y la navegación marítima, entre otras; incremento de los recursos necesarios para su mantenimiento, tales como el agua, la energía, los alimentos y las comunicaciones; tratamiento posterior de los residuos sólidos urbanos, de las aguas residuales, depuración de las aguas y emisión de contaminantes.

Fuente: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team

Figura 260 (abajo a la derecha): Mapa de situación de los proyectos urbanísticos de Dubai.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Dubai_Bauprojekte.png





7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

MANUALES Y TUTORIALES DE TELEDETECCIÓN

CAMPBELL, J.B. 1987. *Introduction to Remote Sensing*, New York, The Guilford Press, 551 pp.

CCRS, 2009. *Fundamentals of Remote Sensing*, Canada Centre for Remote Sensing, 258 pp. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf

CHUVIECO, E. 2008. *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio,* Barcelona, Ed. Ariel Ciencia, 3ª ed., 594 pp.

CHUVIECO, E. y HUETE, A. 2010. *Fundamentals of satellite remote sensing*, Boca Raton, 436 pp.

SHORT, N.M. 1982. *The Landsat Tutorial Workbook. Basics of satellite Remote Sensing*, Washington, NASA, 553 pp.

SHORT, N. 2009. Remote Sensing Tutorial, NASA, http://rst.gsfc.nasa.gov/

OTRAS OBRAS Y ARTÍCULOS CITADOS

ÁLVAREZ COBELAS, M., MUÑOZ RUIZ, P. y RUBIO OLMO, A., 1991. *La eutrofización de las aguas continentales españolas*, Barcelona, Henkel Ibérica, 339 pp.

BALTANÁS, A. 1999. Plan Andaluz de Prevención de Inundaciones, en *Previsión y Mitigación de Avenidas: Nuevas Técnicas de Planificación y Gestión*, Tetuán, 1999.

BANCO MUNDIAL, 2008. *Informe sobre el desarrollo mundial 2009. Una nueva Geografía Económica. Panorama general*. Washington, Banco Mundial, 31ª ed, 48 pp. www.worldbank.org.

BORRÁS, G. 2010. *Mareas negras*, http://www.cetmar.org/documentacion/mareas_negras.htm, visto el 6 de mayo de 2010, Fundación CETMAR.

BOYLE, B. 2004. *La urbanización: una fuerza ambiental considerable*, Informe del Population Reference Bureau, http://www.prb.org/SpanishContent/Articles/2004/LaUrbanizacionUnaFuerzaAmbientalConsiderable.aspx.

BROWN, J.F, LOVELAND, T.R., MERCHANT, J., REED, B.C. y OHLEN,D.O. 1993. Using multisource data in global land-cover characterization: concepts, requirements and methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59: 977-987.

CHUVIECO, E. 1995. *Teledetección y Medio Ambiente*, Madrid, UNED, video VHS y guía.

CIFUENTES, P., GONZÁLEZ ALONSO, S. y RAMOS, A. 1993. *Diccionario de la Naturaleza*, Madrid, Espasa Calpe-BBV, 694 pp.

ECHARRI, 2009. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*, http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/indice.html

EL PAÍS-AGUILAR, 1991. Atlas El País-Aguilar, Barcelona, El País-Aguilar, 311 pp.

ETKIN, D.S. y WELCH, J. 1997. *Oil Spill Intelligence Report International Oil Spill Database: Trends in Oil Spill Volumes and Frequency*, en 1997 International Oil Spill Conference, http://www.iosc.org/papers/01480.pdf.

FAO, 1976. A framework for land evaluation, *Soil Bulletin*, 32, Roma, FAO.

FAO, 2009. Situación de los bosques del mundo 2009, Roma, FAO, 176 pp. www.fao.org.

FECYT, 2010. *Vertidos de petróleo en el mar*, http://www.fecyt.es/especiales/vertidos/1.htm, visto el 30 de abril de 2010.

FOLEY, J.A., DEFRIES, R., ASNER,G.P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S.R., CHAPIN, F.S., COE, M.T., DAILY, G.C., GIBBS, H.K., HELKOWSKI, J.H., HOLLOWAY, T., HOWARD, E.A., KUCHARIK, C.J., MONFREDA, C., PATZ, J.A. PRENTICE, I.C., RAMANKUTTY, N., y SNYDER, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.

FREIRE, J. y LABARTA, U. 2003. *El "Prestige": impactos sobre los recursos y ecosistemas marinos*, Fundación Santiago Rey Fernández-Latorre, A Coruña.

GONZÁLEZ, J.L. 2009. Situación actual de los riesgos naturales en la planificación del territorio. En GONZÁLEZ, J.L. (Ed.) *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*, Madrid, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos: 13-24.

GRUEIRO NOCHE, G. 2008. *Evaluación espacio-temporal de hidrocarburos en aguas del mar después del vertido del buque Prestige en las costas de Galicia y del Cantábrico*, Tesis Doctoral Inédita, Universidad de A Coruña.

GUINEY, J.L. y LAWRENCE, M.B. 1999. *NHC Mitch Report. Hurricane Mitch Tropical Cyclone Report*, National Hurricane Center, www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html.

HUTCHINSON, J.N. y KOJAN, E. 1975. The Mayunmarca Landslide of 25 April 1974, UNESCO, Serial No. 3124/RMO.RD/SCE. http://unesdoc.unesco.org/images/0001/000154/015477eb.pdf

ITOPF, 2010, *Major Oil Spills*, http://www.itopf.com/information%2Dservices/data%2Dand%2Dstatistics/statistics/index.html#major, visto el 6 de mayo de 2010.

IUCN-WWF, 1999. *Metals from the forests: mining and forest degradation*, IUCN, Forest Conservation Programme-WWF, Netherlands Committee for IUCN-Gland, IUCN-WWF.

KEISHA, H. 2005. Trends in Oil Spills from Tanker Ships 1995-2004. *28th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar*, Calgary, Canada, http://www.itopf.com/_assets/documents/amop05.pdf.

LÓPEZ RUIZ, J. 2002. *El mar: contaminación, características químicas y eutrofización*, Madrid, Miraguano Ediciones, 251 pp.

LULLA, K., HELFERT, M., AMSBURY, D., WHITEHEAD, V. S., EVANS, C. A., WILKINSON, M. J., RICHARDS, R. N., CABANA, R. D., SHEPHERD, W. M., AKERS, T. D. y MELNICK, B. E., 1991. Earth observations during Shuttle flight STS-41: Discovery's mission to planet Earth, October 6-10, 1990, *Geocarto International,* 6(1): 69-80

MARTÍNEZ VEGA, J. y ECHAVARRÍA, P. 2008. Detección de cambios en la ocupación del suelo y sus impactos ambientales sobre los ecosistemas acuáticos: el caso de La Mancha Occidental (España Central). En VV.AA. *España y el Mediterráneo: una reflexión desde la Geografía española. Aportación Española al 31º Congreso Internacional de la Unión Geográfica Internacional*, Madrid, Real Sociedad Geográfica-AGE-Instituto Geográfico Nacional, 25 pp.

MATEU, J.F y CAMARASA, A.M. 2000. Las inundaciones en España en los últimos veinte años. Una perspectiva geográfica. *Serie Geográfica*, 9: 11-15.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 1998. *Libro Blanco del Agua en España*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 855 pp.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2000. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 809 pp.

MOHLER, R. R. J., HELFERT, M. R. y GIARDINO, J. R., 1989. The decrease of Lake Chad as documented during twenty years of manned space flight, *Geocarto International*, 4(1): 75-79.

MONTESINOS, S. y BEA, M., 2008. Aplicaciones operativas de la Teledetección en la planificación y gestión del medio hídrico, *Revista de Teledetección*, 29: 91-100.

MUÑOZ, J. 2000. *Geomorfología General*, Madrid, Síntesis, 351 pp.

OCEANA, 2010. *El vertido de hidrocarburos desde buques a los mares y océanos de Europa. La otra cara de las mareas negras*, http://www.ceida.org/prestige/Documentacion/petroleomardeeuropaoceana.pdf, Visto el 29 de octubre de 2010, 31 pp.

PAOLINI, L., SOBRINO, J.A. y JIMÉNEZ-MUÑOZ. J.C. 2002. Detección de deslizamientos de ladera mediante imágenes Landsat TM: el impacto de estos disturbios sobre los bosques subtropicales del noroeste de Argentina, *Revista de Teledetección*, 18: 21-27.

PLANETA, 1989. *Gran Atlas de España*, Barcelona, Planeta, 7 volúmenes, 1312 pp.

PRB, 2009, *Cuadro de datos de la población mundial 2009*, 19 pp., www.prb.org

REBOLLO, L. 2010. Geología Física. las formas del relieve: modelado glaciar y periglaciar, https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-65108/TAB42351/GF-II-4.pdf

RIAZI, M. y GHAZI, E. 1999. Estimation of Transport properties of Liquids, *Chemical Engineering Communications*,176-1: 175-193

SILOS RODRIGUEZ, J.M. 2008. *Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos*, Universidad de Cádiz.

SIMMON, R, 2009, *Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, NASA-Earth Observatory, http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php.

STRAHLER, A.N. y STRAHLER, A.H. 1989. *Geografía Física*, Barcelona, Omega, 550 pp.

STRANDBERG, C.H. 1975. *Manual de Fotografía Aérea*, Barcelona, Omega, 268 pp.

SUÁREZ, L. y REGUEIRO, M (eds.). 1997. *Guía ciudadana de los riesgos geológicos*, Madrid, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 196 pp.

TECNUN, 2010, *Petróleo en el mar*, http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/11CAgu/160VerPe.htm.

TOWNSHEND, J., JUSTICE, C., LI, W., GURNEY, C. y McMANUS, J., 1991, Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities, *Remote Sensing of Environment*, 35: 243-255.

UGALDE, A. (coord.). 2009. *Terremotos. Cuando la Tierra tiembla*, Madrid, CSIC. Colección Divulgación, 195 pp.

URIOSTE, M. y PACHECO, D. 2001. *Las tierras bajas de Bolivia a finales del s. XX*, PIEB Investigación, 437 pp.

USDA, 1961. *Land Capability classification*, Agricultural USDA Handbook nº 210, Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture.

VÁZQUEZ MAURE, F. y MARTÍN LÓPEZ, J. 1988. *Fotointerpretación*, Madrid, Instituto Geográfico Nacional, 301 pp.

VINUESA, J y VIDAL, M.J. 1991. *Los procesos de urbanización*. Madrid, Síntesis, 205 pp.

VV.AA. 1990. *Gran Atlas de España*, Barcelona, Ed. Planeta, 7 vol., 1.312 pp.

WIKIPEDIA, *La Enciclopedia libre*, http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia: Portada. Se han consultado, en la enciclopedia, múltiples voces, términos y datos contenidos en esta guía.

En contracubierta: Composición de imágenes sobre el planeta azul (continente americano y los océanos Pacífico y Atlántico) y la Luna, con datos de NASA, NOAA y USGS del 9 de septiembre de 1997.
Al oeste de México se observa la formación del huracán Linda.

Cortesía de Stöckli, Nelson y Hasler, Laboratory for Atmospheres.
Goddard Space Flight Center
http://rsd.gsfc.nasa.gov/rsd

Guía Didáctica de

Teledetección y Medio Ambiente

Red Nacional de
Teledetección Ambiental

