



IASI,

Un instrumento de observación meteorológica (casi) perfecto

Xavier Calbet. EUMETSAT

IMAGINEMOS que, como aficionados o profesionales de la meteorología, quisiéramos disponer del instrumento perfecto para observar nuestro pasatiempo favorito, la atmósfera. ¿Qué tipo de instrumento sería?. Indudablemente nos gustaría que midiese perfiles verticales de temperatura, humedad y viento en intervalos de unos pocos kilómetros, cada pocos minutos y cubriendo una buena porción del globo terrestre. Asimismo, sería interesante que pudiese medir la cantidad, tipo y composición de nubes en cualquier punto de la Tierra. Pues bien, no hace falta esperar al futuro para tener un instrumento de estas características disponible. Ese instrumento existe aquí y ahora y se llama IASI. O casi. En realidad, no puede medir vientos ni puede observar las capas de la atmósfera por debajo de una nube espesa, al estar su visión obstruida por ésta, pero reúne todas las demás propiedades de un instrumento de ensueño para los meteorólogos.

Introducción al IASI

La organización europea para la explotación de satélites meteorológicos (EUMETSAT), junto con la agencia espacial francesa (CNES), han puesto en órbita a este instrumento excepcional: IASI. Se trata de un espectrógrafo infrarrojo de muy alta resolución. Dentro de la comunidad de teledetección, a un instrumento de este tipo se le suele denominar "sondeador infrarrojo hiperspectral". IASI está instalado a bordo de la serie de satélites europeos Metop, que conforman el sistema de órbita polar de EUMETSAT (conocido por sus siglas en inglés, "EUMETSAT Polar System", EPS). Un satélite de órbita polar, como el Metop, pasa por encima o casi por encima de los polos en cada una de sus revoluciones alrededor de la Tierra. A medida que la Tierra gira sobre sí misma, los instrumentos a bordo del satélite observan diferentes regiones de la Tierra, cubriendo todo el globo en 12 horas. La mayor parte de los puntos de la Tierra son observados al menos dos veces por día. La cobertura a latitudes más altas es bastante más completa debido al solape de las diferentes órbitas. Metop vuela a una altura nominal de unos 800 km. El satélite vuelve a repetir prácticamente la misma órbita después de cinco días. Para permitir la observación de un punto fijo de la Tierra a aproxi-

madamente la misma hora solar cada día, los satélites de órbita polar se suelen colocar en lo que se denomina órbita helio-síncrona. Metop en concreto completa su órbita descendente, es decir, cuando cruza el ecuador de norte a sur, a aproximadamente las 9:30 hora local. La cobertura global proporcionada por los satélites de órbita polar hace que sus datos sean muy útiles para la predicción numérica del tiempo y para medidas climáticas. Además, y gracias a IASI, Metop también resultará extremadamente útil para medir de forma rápida y precisa el estado de la atmósfera, lo cual es necesario en aplicaciones de "nowcasting" y para analizar en profundidad situaciones meteorológicas particulares. La esperanza de vida de cada uno de los satélites de la serie es de cinco años, cubriendo un periodo total de operaciones de al menos 14 años. Metop-A, el primero de la serie de tres satélites fue lanzado, con éxito, el 19 de octubre de 2006 desde el cosmódromo de Baikonur en Kazajstán. Desde entonces, a través de su conexión con EUMETSAT, está distribuyendo a los usuarios los datos recogidos por sus múltiples sensores.

Sin duda, y debido a sus características, el instrumento estrella a bordo de Metop es IASI. Es un interferómetro Michelson que realiza medidas desde 3,62 a 15,5 micras con una resolución espectral de $0,5 \text{ cm}^{-1}$, proporcionando un total de 8461 canales en diferentes longitudes de onda. IASI realiza un barrido en dirección perpendicular a su trayectoria cada 8 segundos, realizando 30 observaciones diferentes sobre una matriz de detectores de 2×2 células circulares. La distancia perpendicular cubierta es de unos 2200 km sobre la Tierra, permitiendo cubrir el 99% del globo dos veces al día. Sobre la superficie del globo, su resolución espacial es de 12 km en el nadir. Dicha resolución se va empobreciendo a medida que el instrumento observa en direcciones más inclinadas, siendo el mayor ángulo con respecto a la vertical de 47,85 grados.

La muy alta resolución espectral de IASI le permite realizar sondeos verticales de la atmósfera con una resolución vertical sin precedentes de 1 km y una precisión de 1 a 1,7 K en temperatura y de 5 a 20% de humedad relativa en la troposfera. Puesto que IASI mide en el infrarrojo, estas prestaciones las proporciona en condiciones ideales de cielos despejados. Cuando la escena observada contiene menos de un 70% de cobertura nubosa, el rendimiento se mantiene para los niveles

situados por encima de las nubes y lógicamente descendiendo para los niveles situados por debajo de las mismas. Cuando la escena está totalmente cubierta, con una cobertura nubosa superior al 70%, ya no se pueden realizar medidas con IASI por debajo de las nubes.

IASI también jugará un papel importante en el campo de la química atmosférica como medidor de las cantidades de gases traza presentes en la atmósfera. Puede medir la cantidad total de ozono en toda la columna atmosférica observada con una precisión del 5%, junto con su distribución vertical hasta en cuatro capas de la atmósfera con una precisión de un 10%. Otros gases traza tales como la cantidad en columna de CO₂, CH₄ y N₂O también pueden ser medidos.

IASI será capaz también de determinar las temperaturas superficiales del océano y de la tierra. En este caso, este instrumento ayudará a determinar las propiedades espectrales de las superficies medidas.

IASI también podrá medir varias propiedades de las nubes, tales como cobertura nubosa, temperatura de la cima de la nube, tipo y transparencia. Por otro lado, deberá medir la variación de las propiedades ópticas de las nubes en función de la longitud de onda.

IASI como instrumento de observación meteorológica

A partir del espectro de la atmósfera observado por IASI y utilizando un sofisticado algoritmo matemático, se puede determinar el perfil vertical atmosférico de temperatura y humedad. A este proceso se le conoce como "inversión" del espectro. El método matemático más utilizado es la "estimación óptima" ("optimal estimation" en inglés, ver Rodgers 2000). La calidad de las inversiones depende fuertemente del tipo de escena observada por IASI. Podemos ordenar las escenas observadas de mayor a menor precisión en los perfiles verticales de la atmósfera: sobre el océano sin nubes, sobre el océano con nubosidad, sobre tierra con cielos despejados y sobre tierra con nubosidad. Habitualmente también, las observaciones realizadas por el día suelen presentar más problemas que las de la noche, debido principalmente a efectos de la luz solar en las longitudes de onda más cortas.

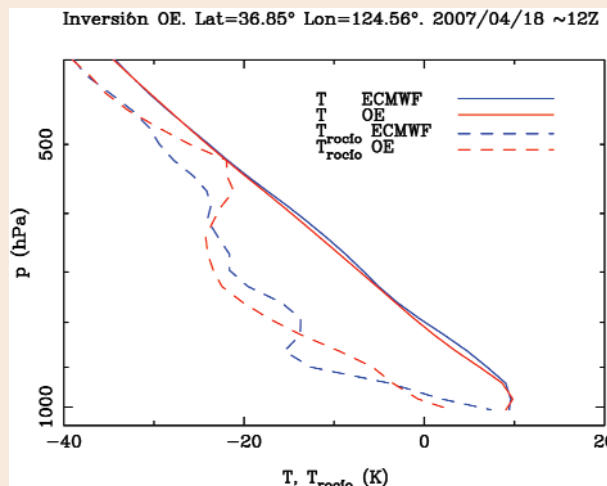


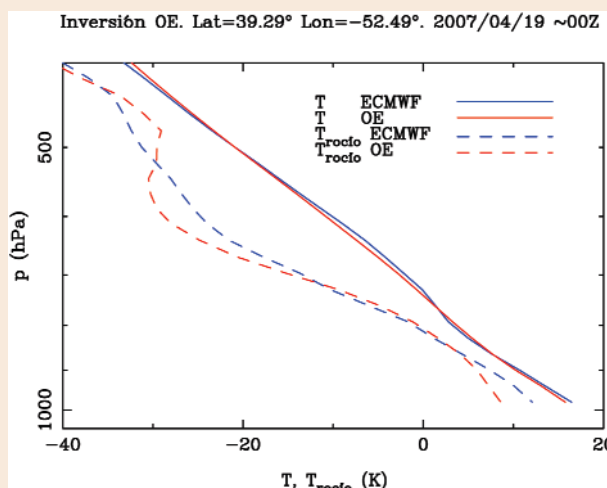
Figura 1

Perfiles verticales mostrando temperatura (línea continua) y temperatura de rocío (línea a trazos). Las líneas azules son perfiles del análisis del ECMWF y las rojas son las obtenidas mediante inversiones del espectro de IASI. Nótese la inversión de temperatura detectada en niveles bajos y el máximo de humedad en 550 hPa.

Figura 2

Perfiles verticales mostrando temperatura (línea continua) y temperatura de rocío (línea a trazos).

Las líneas azules son perfiles del análisis del ECMWF y las rojas son las obtenidas mediante inversiones del espectro de IASI.



Sin duda, las mejores inversiones se obtienen sobre el océano y con cielos despejados, pudiéndose obtener las precisiones mencionadas de 1 K en 1 km en los perfiles de temperatura en la troposfera. La razón de esto estriba en que se conoce con relativa certeza la emisividad del mar, teniendo una variable menos que determinar, lo cual nos permite centrarnos en las inversiones de los perfiles atmosféricos.

En la Fig. 1, podemos ver un típico perfil de IASI. Habitualmente se suele usar como referencia los análisis del Centro Europeo de Predicción (ECMWF), representados junto a los perfiles de IASI. Esto se hace así, porque dichos análisis reproducen bastante bien los perfiles de temperatura de la atmósfera. Sin embargo los perfiles de humedad del ECMWF no suelen ser tan precisos, aunque sigan siendo adecuados. En ese perfil particular, se puede observar que recoge con bastante precisión una inversión de temperatura en superficie. Asimismo el perfil de humedad se asemeja bastante al análisis del ECMWF.

En la Fig. 2, tenemos un perfil más plano en temperatura, el cual está bastante bien recogido por IASI. El perfil de humedad de nuevo sigue con fidelidad el análisis del ECMWF.

¿Y qué pasa con las inversiones de temperatura? En la Fig. 1 ya vimos un ejemplo de cómo IASI puede detectar inversiones de temperatura incluso en niveles bajos con rela-

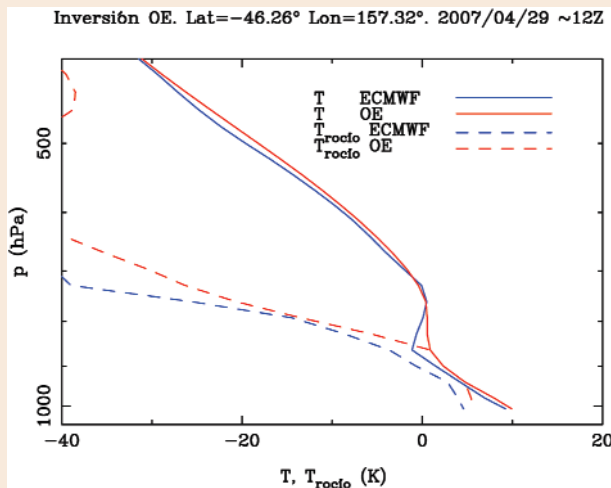


Figura 3

Perfiles verticales mostrando temperatura (línea continua) y temperatura de rocío (línea a trazos). Las líneas azules son perfiles del análisis del ECMWF y las rojas son las obtenidas mediante inversiones del espectro de IASI.

Este perfil posee una potente inversión de temperatura en niveles bajos con altos contenidos de humedad.

inversiones es de unos 300 m, cantidad muy inferior a la resolución vertical teórica de IASI para los perfiles de temperatura (1 km). Como se puede observar, las observaciones de IASI cumplen con las expectativas de 1 a 1,7 K en 1 km, para la temperatura y del 5 al 20% para la humedad.

Dadas las excepcionales prestaciones de los perfiles de IASI, cabe imaginar numerosas aplicaciones que puedan aprovecharlas. Una de las más obvias es calcular algún índice de inestabilidad de la atmósfera. Esto es lo que haremos en la siguiente sección.

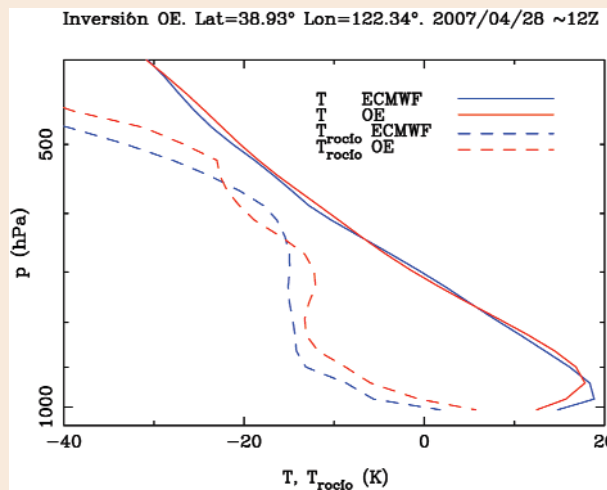
Inversiones del espectro sobre el océano con cielos nublados

Se pueden realizar también inversiones de escenas nubladas sobre el océano. Al no disponer todavía de casos de estudio interesantes para IASI, exponemos aquí los resultados obtenidos anteriormente con otro instrumento similar: el AIRS. AIRS es también un espectrógrafo hiperespectral infrarrojo a bordo del satélite Aqua de la NASA. Mide la región espectral en diferentes intervalos desde 3,74 a 15,4 micras con una resolución espectral ($\lambda/\Delta\lambda$) de

Figura 4

Perfiles verticales mostrando temperatura (línea continua) y temperatura de rocío (línea a trazos). Las líneas azules son perfiles del análisis del ECMWF y las rojas son las obtenidas mediante inversiones del espectro de IASI.

Este perfil muestra una fuerte inversión de temperatura y un máximo de humedad en 600 hPa.



tivamente poca humedad en superficie. Otras inversiones cerca de la superficie con más humedad, tales como las típicas de las situaciones de vientos alisios, también suelen estar bien detectadas, tal y como vemos en la Fig. 3.

¿Y de los niveles con máximos de humedad? En la Fig. 4, vemos como un máximo de humedad a la altitud de la presión de 600 hPa está recogido con bastante precisión; este perfil también posee una potente inversión en superficie.

Estos no son más que unos pocos ejemplos de los perfiles que se pueden obtener con IASI. Para tener una visión global de la calidad de las inversiones de IASI podemos comparar una gran cantidad de ellos con los análisis del ECMWF. En la Fig. 5, mostramos las estadísticas de los perfiles de temperatura y humedad para 266 escenas nocturnas, sin nubosidad y sobre el océano entre los días 10/04/2007 y el 29/04/2007. El espaciamiento vertical utilizado para realizar las

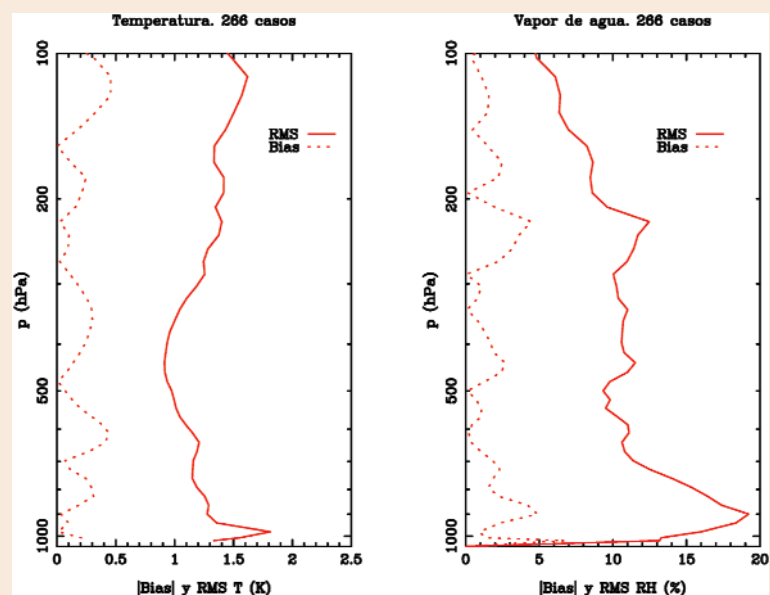


Figura 5: Estadística de la diferencia entre los perfiles obtenidos con inversiones del espectro de IASI y los del ECMWF. La línea continua es la raíz del promedio del cuadrado de las diferencias (RMS), la cual cuantifica el error de la medida. La línea de puntos es el valor absoluto del promedio de las diferencias (Bias). Nótese que estas estadísticas han sido calculadas sobre unos niveles con un espaciamiento vertical de unos 300 m, cantidad muy inferior a la resolución vertical teórica de IASI para los perfiles de temperatura (1 km).

1200, dando un total de 2378 canales. Su resolución espacial es de unos 14 km. en el nadir. Se trata de un instrumento experimental, en contraposición de IASI, que es operativo. Este instrumento, puesto en el espacio en mayo del 2002, ha sido y está siendo muy útil para demostrar las capacidades de este tipo de instrumentación. EUMETSAT ha estado utilizando datos de este instrumento hasta hoy, para prepararse para el procesamiento de información de IASI.

El estudio se hizo en las proximidades de las islas Canarias y la situación sinóptica se resume en la Fig. 6. Se puede observar en superficie un alisio moderado. En el panel sobre la superficie del océano de la figura se muestra el canal infrarrojo (9) del Meteosat. Se puede ver la existencia de nubes bajas en verde y amarillo sobre este panel. También existe un núcleo convectivo (en morado) que dio lugar a una tormenta, justo al norte de Tenerife. En niveles altos se aprecia un núcleo frío (en azul en el panel en altura) y una depresión aislada en niveles altos (DANA) señalada claramente por los vientos en altura.

La pregunta que nos hacemos es si el análisis del ECMWF o los perfiles observados por AIRS recogen esta situación puntual de inestabilidad. Para ello haremos un estudio puramente termodinámico de la situación mostrando lo que aquí denominaremos índice "CAPE por niveles". El CAPE ("Convective Available Potential Energy", en inglés) es la energía potencial disponible para la convección. En este caso dicha energía está calculada suponiendo un ascenso adiabático partiendo desde la superficie. Este índice suele resultar muy útil para ver si es posible la convección y cuán fuerte puede llegar a ser. Habitualmente se calcula integrando la energía potencial disponible en cada uno de los niveles por los que va atravesando la supuesta burbuja de aire en su ascenso adiabático. Pues bien, definiremos el "CAPE por niveles", como el CAPE de un nivel particular de la atmósfera, sin integrarlo a lo largo de toda la columna atmosférica. Así pues, tendremos un valor del "CAPE por niveles" para cada punto geográfico y cada nivel atmosférico en la vertical. Si dicho índice es negativo, significa que el nivel es estable frente a los desarrollos convectivos. Si por el contrario es positivo, el nivel será inestable.

En la Fig. 7 se muestra el CAPE por niveles calculado con el análisis del ECMWF. Sobre la superficie (panel de abajo en la imagen) se muestra de nuevo la imagen del canal 9 (infrarrojo) del Meteosat, pero esta vez representada en forma de montañas semitransparentes con alturas correspondientes a las temperaturas de brillo de la imagen infrarroja, más altas cuanto más fría sea la imagen. Se aprecia muy bien el núcleo convectivo en el centro. En el panel vertical se muestra dicho índice, codificado de forma que los niveles verdes, amarillos y rojos son estables y los cían y azules, inestables. Se aprecia

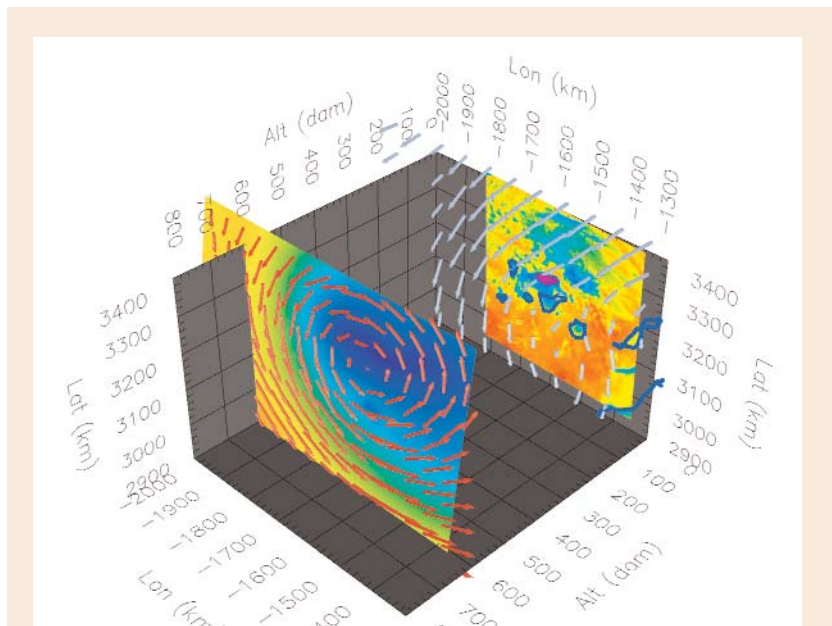


Figura 6

Situación sinóptica para el caso de estudio en las cercanías de las islas Canarias. Está compuesta de un panel sobre la superficie de la Tierra (a la derecha en la imagen) y uno en altura a unos 6000 m (a la izquierda en la imagen). La línea de costa de las islas Canarias se muestra en azul en el panel de superficie. También en el panel de superficie se muestra la imagen del Meteosat en un canal infrarrojo (canal 9) codificada en colores. Se pueden apreciar nubes bajas al norte de las islas (verde y amarillo) y un núcleo convectivo justo al norte de Tenerife (en morado). Los vientos en superficie se muestran en el panel de superficie como flechas grises, estando presente un alisio moderado. En el panel en altura se muestra la temperatura codificada en colores (azul frío y rojo caliente) y los vientos como flechas en rojo. Se aprecia claramente una depresión aislada en niveles altos (DANA) con su núcleo frío (en azul).

claramente una región extremadamente estable (en rojo) en la parte superior del panel, que es la tropopausa. Debajo de ella y llegando hasta los niveles medios de la troposfera se aprecia también una zona altamente inestable (en azul y cían) causada por las bajas temperaturas en niveles altos. Al norte de la convección (derecha en la imagen) se aprecia (en amarillo) una capa estable en niveles bajos sobre las nubes. Al lado sur (izquierda en la imagen) se aprecia otra capa estable más gruesa y en una región más alta que la anterior (también en amarillo). Estas dos capas estables se solapan en la zona de convección con una estrecha zona inestable entre ellas (en cían). Debido a ello, y atendiendo a argumentos puramente termodinámicos, la convección no se debería haber producido, puesto que la burbuja ascendente tendría que atravesar dos capas estables.

En la Fig. 8, se muestra el CAPE por niveles calculado a partir de los perfiles obtenidos de los espectros de AIRS. La representación y el código de colores son idénticos a la Fig. 7, con la excepción de que se muestran en rojo saturado las regiones donde no se ha podido realizar una inversión del espectro de AIRS. El motivo de ello es, o bien porque se está fuera de la región donde se realizaron las inversiones, o bien porque la nubosidad es demasiado densa como para determinar un perfil, como es el caso de la zona convectiva. Las características generales del CAPE por niveles para AIRS son iguales a los

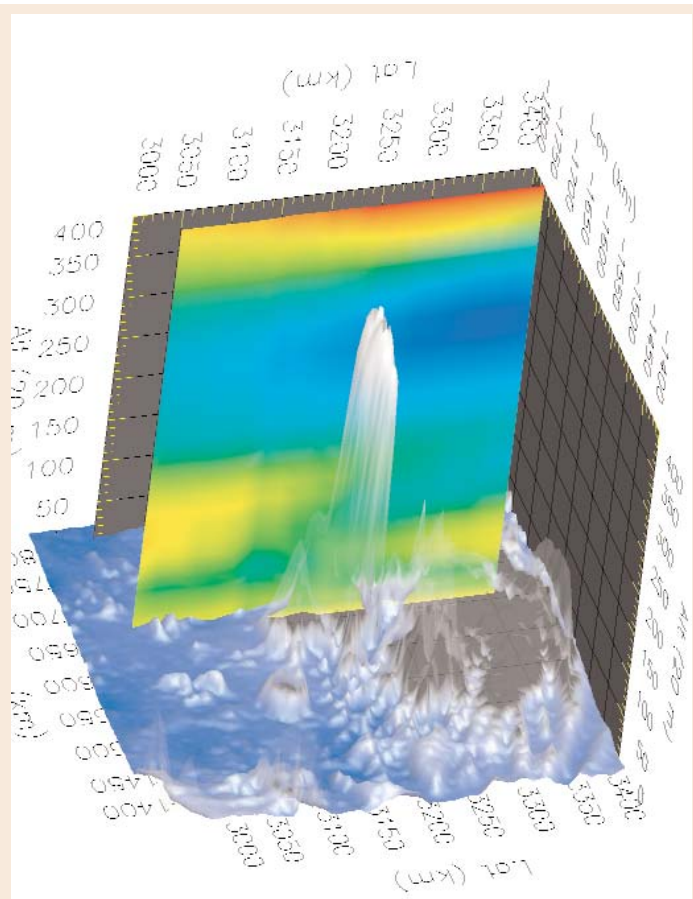


Figura 7

CAPE por niveles de la situación sinóptica mostrada en la Fig. 6, donde el norte está dirigido hacia la derecha en la imagen y el sur hacia la izquierda. Sobre la superficie (panel de abajo en la imagen) se muestra de nuevo la imagen del canal 9 (infrarrojo) del Meteosat, pero esta vez representada en forma de montañas semitransparentes con alturas correspondientes a las temperaturas de brillo de la imagen infrarroja, más altas cuanto más fría sea la imagen. Se aprecia claramente la zona convectiva en el centro. El panel vertical muestra el CAPE por niveles, energía potencial disponible para la convección por nivel (ver texto para una explicación más extensa), obtenido a partir de los análisis del ECMWF. El color rojo, amarillo y verde indica zonas estables y el azul y cian inestables. Se puede ver la zona inestable en niveles altos y por encima de ella la tropopausa (en rojo). Se aprecian también dos regiones estables en niveles bajos al norte y al sur del núcleo convectivo.

determinados a partir de los análisis del ECMWF. Hay algunas diferencias que merece la pena comentar. La primera es que los campos son menos suaves y más ruidosos que los del ECMWF, cosa lógica tratándose de medidas reales en contraposición con campos de un modelo. La segunda y más importante, reside en el hecho de que existe una zona estrecha e inestable a lo largo de toda la columna vertical, en el lugar donde se produce la convección. Este hecho contrasta con la relativa estabilidad de los análisis del ECMWF de la Fig. 7. No podemos saber si inicialmente la inestabilidad era similar a la del análisis y posteriormente se inestabilizó debido a la convección, o por el contrario el análisis del ECMWF no recogió la situación correctamente y la inestabilidad se originó por tener esa columna la alta inestabilidad observada por AIRS.

Desgraciadamente, y puesto que se trata de un satélite de órbita polar, sólo tenemos medidas de ese instante y no del inmediatamente anterior o posterior.

Cómo conseguir los datos de IASI

Si finalmente se animan a usar los datos de IASI, su acceso no es excesivamente complicado. La licencia de disseminación de datos de Metop, y por consiguiente de IASI, permite

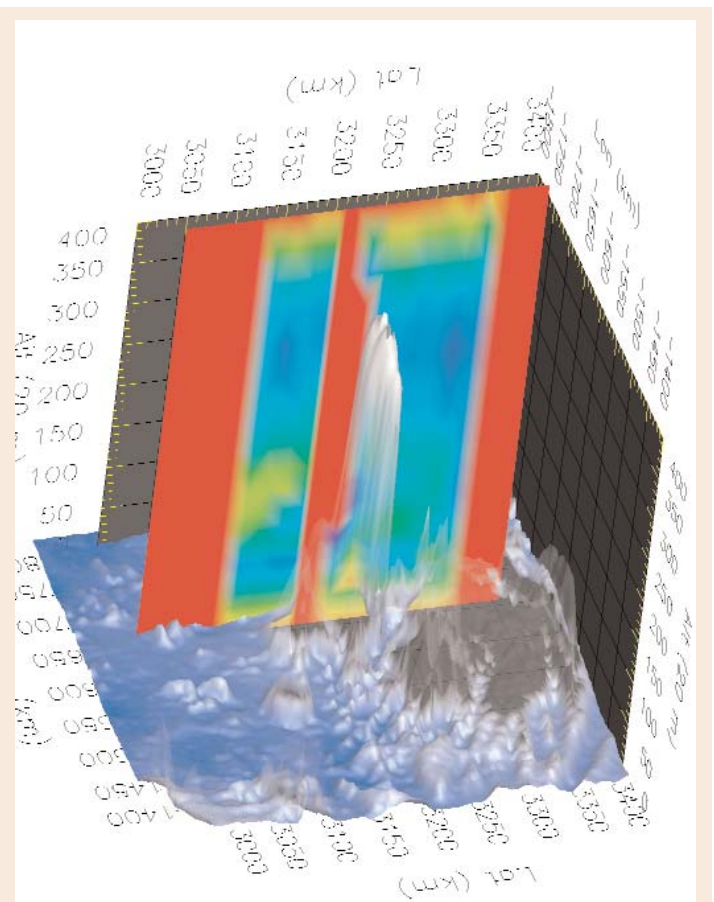


Figura 8

CAPE por niveles de la situación sinóptica mostrada en la Fig. 6, donde el norte está dirigido hacia la derecha en la imagen y el sur hacia la izquierda. Sobre la superficie (panel de abajo en la imagen) se muestra de nuevo la imagen del canal 9 (infrarrojo) del Meteosat, pero esta vez representada en forma de montañas semitransparentes con alturas correspondientes a las temperaturas de brillo de la imagen infrarroja, más altas cuanto más fría sea la imagen. Se aprecia claramente la zona convectiva en el centro. El panel vertical muestra el CAPE por niveles, energía potencial disponible para la convección por nivel (ver texto para una explicación más extensa), obtenido a partir de las inversiones de los espectros de AIRS. El color rojo, amarillo y verde indica zonas estables y el azul y cian inestables. Las extensas regiones en rojo saturado indica zonas donde no se han podido determinar perfiles verticales atmosféricos con AIRS. Se puede ver la zona inestable en niveles altos y por encima de ella la tropopausa (en rojo). Se aprecian también dos regiones estables en niveles bajos al norte y al sur del núcleo convectivo. También se aprecia la estrecha columna inestable a todos los niveles donde se produce la convección.

su utilización de forma gratuita con fines amateurs o educativos. Basta con obtener una licencia de EUMETSAT. Hay varias formas de recibir los datos, la más popular es a través de EUMETCast. Este servicio permite a los usuarios recibir los datos con una sencilla antena parabólica de televisión por satélite acoplada a un PC para la adquisición y almacenamiento de datos. Para más información se puede consultar la página web de acceso de datos de EUMETSAT (ver bibliografía).

El futuro

¿Os imagináis un instrumento tipo IASI en órbita geoestacionaria de forma que observe cada 15 minutos la misma región del globo tal y como hace hoy en día Meteosat? Las aplicaciones de este instrumento podrían ser enormes. Entre otras cosas, podríamos haber rastreado la atmósfera en nuestro caso de estudio desde el origen de la convección hasta su final. El principal inconveniente es que resulta mucho más complicado poner este tipo de instrumentos en órbita geoestacionaria que en órbita polar debido a la gran distancia de la Tierra a la que están los primeros. Esto es precisamente lo que se está planeando para la siguiente generación de satélites Meteosat (MTG) si hay suficientes recursos económicos para ello (ver bibliografía)

Bibliografía

Rodgers, C. D., 2000, Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice, World Scientific Publishing Co.

Peter Schlüssel, Tim H. Hultberg, Pepe L. Phillips, Thomas August and Xavier Calbet, 2005, The operational IASI Level 2 processor, Advances in Space Research, Volume 36, Issue 5, Pages 982-988.

Dieter Klaes, Marc Cohen, Yves Buhler, Peter Schlüssel, Rosemary Munro, Juha-Pekka Luntama, Axel von Engel, Eoin Ó Cléirigh, Hans Bonekamp, Jörg Ackermann, and Johannes Schmetz, An Introduction to the EUMETSAT Polar system, Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 88, Issue 7, Pages 1085-1096.

Xavier Calbet, Peter Schlüssel, Tim Hultberg, Pepe Phillips and Thomas August, 2006, Validation of the operational IASI level 2 processor using AIRS and ECMWF data, Advances in Space Research, Volume 37, Issue 12, Pages 2299-2305.

Acceso a datos de EUMETSAT

http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/index.htm?l=en

AIRS

<http://www-air.s.jpl.nasa.gov/>

Telet tiempo

**MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE**

INSTITUTO NACIONAL
DE METEOROLOGÍA

*Servicio telefónico permanente
de información meteorológica
(24 horas al día)*

GENERAL PARA ESPAÑA
807 170 365

PROVINCIAL Y AUTONÓMICA
807 170 3
(Completar con las dos cifras del código provincial)

MARÍTIMA

Baleares	807 170 370
Mediterráneo	807 170 371
Cantábrico/Galicia (costera)	807 170 372
Canarias/Andalucía Occidental (costera)	807 170 373
Atlántico alta mar	807 170 374

DE MONTAÑA

Pirineos	807 170 380
Picos de Europa	807 170 381
Sierra de Madrid	807 170 382
Sistema Ibérico	807 170 383
Sierra Nevada	807 170 384
Sierra de Gredos	807 170 385

EUMETSAT

<http://www.eumetsat.int>

IASI

<http://smc.cnes.fr/IASI/>

Meteosat tercera generación (MTG)

http://www.eumetsat.int/home/Main/What_We_Do/Satellites/Future_Satellites/Meteosat_Third_Generation/index.htm

Metop EUMETSAT

http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/EUMETSAT_Polar_System/index.htm

Metop ESA

<http://www.esa.int/esaLP/LPmetop.html>