

Mosaico de las misiones espaciales en las que participa el Grupo de Ciencias Planetarias. Columna izquierda y de arriba a abajo: *Venus Express* (ESA), *Mars Express* (ESA) y *JUICE* (ESA). Columna derecha: *Mars 2020* (NASA) y *ExoMars20* (ESA). [Todas las imágenes son cortesía de los autores]

EL GRUPO DE CIENCIAS PLANETARIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO (GCP-UPV/EHU)

A PESAR DE SU JUVENTUD, EL GCP-UPV/EHU ES UN REFERENTE EN EL ESTUDIO DE LAS CIENCIAS PLANETARIAS. DESCRIBIMOS SUS ORÍGENES, LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y PROYECTOS FUTUROS.

AGUSTÍN SÁNCHEZ LAVEGA, RICARDO HUESO Y SANTIAGO PÉREZ HOYOS



Artículo exclusivo
colaboración de la
Sociedad Española
de Astronomía

LOS ORÍGENES DEL GCP

Es difícil dar una fecha de nacimiento para el Grupo de Ciencias Planetarias (GCP) de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), aunque podemos ubicarlo hacia el año 1995 cuando Agustín Sánchez Lavega obtiene la primera financiación pública para un proyecto de investigación sobre las atmósferas de Júpiter y Saturno. Previamente, durante los años 1980 a 1987 Agustín había trabajado en el Observatorio de Calar Alto, época durante la que desarrolló su tesis doctoral sobre la atmósfera de Saturno, primera en defenderse en la UPV/EHU en el ámbito de la astronomía (véase *Astronomía*, enero 2015). En la década de los noventa, gracias a una estrecha colaboración con el Observatorio del Pic-du-Midi, Agustín continuó la investigación en las atmósferas planetarias dentro de la UPV/EHU. Un punto de inflexión clave para el nacimiento del GCP fue la publicación de un artículo sobre la Gran Mancha Blanca de Saturno del año 1990 en la revista *Nature*, que ocupó portada y tuvo un alto impacto nacional e internacional. Hay que decir que durante esa época los estudios del Sistema Solar eran escasos en España y fue sobre todo gracias al impulso de la exploración planetaria que a comienzos de los años noventa creció el interés por esta temática dentro del fuerte desarrollo que la astronomía y astrofísica habían adquirido en nuestro país (véase Sánchez Lavega, 2017).

En 1999 tuvo lugar la defensa de la primera tesis doctoral dentro del GCP iniciándose lo que hoy es el núcleo principal del grupo. En total son ya once las tesis defendidas sobre atmósferas planetarias en la UPV/EHU y otras cuatro están actualmente en curso. El GCP está formado por doce doctores (siete en plantilla de la UPV/EHU y el resto colaboradores de otros centros), seis doctorandos y contratados, y un colaborador externo. A ellos se suman cada curso nuevos estudiantes del Máster en Ciencia y Tecnología Espacial. Su sede se encuentra en el Departamento de Física Aplicada I de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y vinculado al mismo se encuentra el Aula Espazio Gela y su Observatorio Astronómico, que constituyen la cantera formativa de futuros científicos y tecnólogos en el ámbito astronómico y espacial. El GCP es un grupo consolidado que forma parte del sistema universitario de grupos de investigación del Gobierno Vasco. Durante los años

COLABORACIÓN AMATEUR

Desde nuestros inicios una parte muy importante de nuestra investigación ha estado apoyada por la colaboración con astrónomos aficionados y hemos participado activamente en la comisión Pro-Am de la Sociedad Española de Astronomía. Como se ha visto en este artículo, los aficionados a la observación planetaria participan de una manera destacada en el seguimiento y descubrimiento de fenómenos atmosféricos en diferentes planetas. Fruto de ello, en el año 2003 recibimos el encargo de coordinar la división de atmósferas del *International Outer Planet Watch* (IOPW) que con el tiempo derivó en la elaboración por nuestro grupo de una base de datos online de observaciones de aficionados de los planetas gigantes: *Planetary Virtual Observatory Laboratory* (PVOL). Actualmente, y con el apoyo de un proyecto europeo, hemos podido modernizar esta base de datos a una nueva versión, PVOL2, que alberga imágenes de todos los planetas del Sistema Solar, la Luna y los satélites gigantes de Júpiter. Desde estas páginas hacemos un llamamiento a los aficionados españoles para que envíen sus observaciones planetarias a esta base de datos utilizada por investigadores de todo el mundo. Visitar: pvol2.ehu.eus.

2013-2016 el GCP formó una Unidad Asociada del CSIC junto con el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Desafortunadamente, la muerte prematura del investigador Javier Gorosabel en 2015 nos llevó a clausurar dicha asociación. En la página web (www.ajax.ehu.eus) pueden seguirse las actividades de nuestro grupo que a continuación describimos.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Desde sus inicios, el objeto fundamental de la investigación del GCP han sido las atmósferas planetarias y, en concreto, sus partes más densas y dinámicas, donde se ubican las capas visibles de nubes y aerosoles. Nuestra investigación aborda el estudio de la dinámica atmosférica: la caracterización de la circulación general y de los vientos locales en una amplia variedad de procesos dinámicos en diversas escalas. Es decir, el estudio de la meteorología planetaria. Además estudiamos las propiedades y distribución de las nubes y aerosoles (partículas en suspensión) y su influencia en la luz reflejada y en la radiación que escapa de los planetas. Para ello utilizamos dos vías en paralelo: por un lado, la observación tanto con telescopios



FIGURA 1. El Grupo de Ciencias Planetarias casi al completo. Fila superior y de izquierda a derecha: Santiago Pérez-Hoyos, Agustín Sánchez Lavega, Iñigo Mendikoa Alonso, José Félix Rojas, Ander Garro Abraín, Jon Juaristi Campillo, Teresa del Río Gaztelurrutia, José Francisco Sanz Requena, Jon Legarreta Etxegibel e Iñaki Ordóñez Etxeberria. Fila inferior y de izquierda a derecha: Ricardo Hueso Alonso, Hao Chen Chen, Itziar Garate López, Javier Peralta Calvillo y Enrique García-Melendo. Faltan en la fotografía: Arrate Antuñano Martín y Naiara Barrado Izagirre. El logo del GCP aparece en la esquina superior izquierda.

en Tierra como con diversas misiones espaciales (incluyendo el Telescopio Espacial Hubble). Por otro lado, la vía teórica, fundamentada en el desarrollo tanto de modelos dinámicos capaces de simular aspectos de estas atmósferas como de códigos de transporte radiativo con los que explicar e interpretar los resultados de las observaciones. Para ello, contamos con potentes recursos computacionales así como con servidores específicos para el almacenamiento y archivo de la ingente cantidad de datos proporcionados por misiones espaciales como *Voyager*, *Cassini*, *Venus Express* o el *Mars Science Laboratory (Curiosity)*, entre otras muchas. Una parte importante de este trabajo se ha

llevado adelante gracias al desarrollo de software propio, desde herramientas de análisis de imágenes a la elaboración de modelos físicos analíticos (ondas e inestabilidades dinámicas) y numéricos (convección húmeda en los gigantes, dinámica «*shallow water*» y transporte radiativo), por citar algunos. También mantenemos una extensa colaboración con el mundo de los aficionados a la astronomía haciendo uso de software amateur como los afamados *Autostakkert!* y *WinJupos* para el análisis de imágenes planetarias, así como los modelos de circulación general (*EPIC* y *LMD-GCM Marte*) y de transporte radiativo (*NEMESIS*). Además, los miembros del GCP participan regularmente en la divulgación científica mediante conferencias públicas y colaborando a través de numerosos medios de comunicación.

ATMÓSFERA DE VENUS

Nuestros estudios de Venus arrancan con la participación en el instrumento VIRTIS de la misión *Venus Express* de la ESA en el año 2004. VIRTIS era una cámara hiperespectral capaz de obtener imágenes y espectros del planeta en luz visible e infrarroja hasta 5 micras. Nuestra investigación se ha

encaminado a la caracterización de la superrotación atmosférica que hace que Venus gire sesenta veces más rápido en su alta atmósfera que en la superficie (la atmósfera superior alcanza velocidades de 360 km/h que permiten a las nubes superiores rotar sobre el planeta en cuatro días). Con VIRTIS hemos determinado la estructura tridimensional del viento al nivel de diferentes nubes entre 45 y 68 km de altura y hemos podido caracterizar sus variaciones temporales, incluidos los efectos asociados a la diferencia de temperatura en las nubes superiores entre el día y la noche. También hemos estudiado la morfología nubosa y las ondas atmosféricas que se propagan por la atmósfera (incluida su famosa «Y»). Además, hemos estudiado la naturaleza cambiante del gran vórtice polar del hemisferio sur analizando sus cambios y transformando las imágenes infrarrojas en mapas de temperatura en diferentes niveles de altura. Con VIRTIS hemos estudiado también la dinámica de la mesosfera (20 km por encima del nivel de las nubes superiores) gracias a fenómenos de luminiscencia nocturna mucho más intensos que en la Tierra. En estos trabajos hemos utilizado además imágenes de las naves *Galileo* y *Messenger*, por ejemplo para investigar la naturaleza del misterioso absorbente ultravioleta, así como observaciones con telescopios en Tierra. Actualmente continuamos estudiando Venus en colaboración con investigadores japoneses de la misión *Akatsuki* (JAXA) y del Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) en París.

ATMÓSFERA DE MARTE

El planeta Marte ha sido durante muchos años la asignatura pendiente del GCP. Sin embargo, recientemente hemos entrado con fuerza en su investigación. Nuestra publicación en la revista *Nature* en 2015 acerca de la presencia de una nube o penacho extremadamente alta (entre 200 y 250 km de altura) en el limbo del planeta armó un cierto revuelo. Fue además realizado en base a numerosas imágenes obtenidas por astrónomos aficionados. Motivados por esta observación hemos continuado los estudios de nubes de hielo de agua y polvo en el limbo usando imágenes de la cámara VMC a bordo de la misión *Mars Express* (ESA) con alturas entre 50 y 90 km. Esta nueva línea de investigación nos ha permitido participar en dos misiones espaciales futuras llamadas a

EL GCP EN EL ESPACIO

En el GCP habíamos venido trabajando desde nuestros inicios con las imágenes disponibles en las bases de datos de misiones espaciales, en particular las *Voyager 1* y *2*, y posteriormente las misiones *Galileo* y *Cassini*, fundamentalmente. En 2004, con nuestra entrada en la misión *Venus Express* (ESA), el GCP comienza su participación directa en proyectos espaciales que continúa actualmente en una variedad de proyectos. Actualmente colaboramos con el Centro de Astrobiología de Madrid (CAB) en el instrumento MEDA para el estudio de la meteorología y del polvo en Marte que se embarcará en el rover *Mars 2020* (NASA), y con el INTA en los instrumentos SIS y DS a bordo de *ExoMars 20* (ESA) para el estudio de la radiación solar y el polvo en Marte. Recientemente hemos comenzado un nuevo proyecto con la ESA consistente en la explotación científica de las imágenes que se toman con la cámara VMC a bordo de la misión *Mars Express*. El GCP mira al futuro con su participación en la cámara JANUS y en el instrumento MAJIS, un espectrógrafo y cámara para el visible e infrarrojo cercano (0,9-5,7 micras), que se embarcarán en la misión *JUICE - Jupiter ICy moons Explorer* (ESA) para el estudio del sistema de Júpiter en 2029-2033.

realizar importantes avances en Marte: *Mars 2020* (NASA) y *Exomars 20* (ESA). Actualmente usamos datos del vehículo *Mars Science Laboratory* (*Curiosity*) para estudiar las variaciones de presión en el día a día y año a año marcianos siguiendo las estaciones marcianas que permiten condensar una parte importante de la atmósfera en los casquetes polares del planeta, los remolinos de polvo denominados «*dust devils*» y la abundancia de polvo en el entorno de este vehículo. También trabajamos en la caracterización de las propiedades físicas del polvo a través de los datos recogidos *in situ* por los rover que recorren la superficie del planeta.

LAS ATMÓSFERAS DE JÚPITER Y SATURNO

Tradicionalmente, estos han sido los planetas más estudiados por el grupo usando para ello datos e imágenes tomados por una amplia batería de instrumentos en Tierra, el Telescopio Espacial Hubble, y las naves *Voyager 1* y *2*, *Galileo*, *New Horizons* en su sobrevuelo de Júpiter, *Cassini* y actualmente *Juno*. Nuestro grupo ha tenido un reconocimiento internacional a través de las medidas de alta precisión de la circulación general al nivel de las nubes constituyendo una referencia en los estudios de estos planetas. Este reconocimiento se extiende

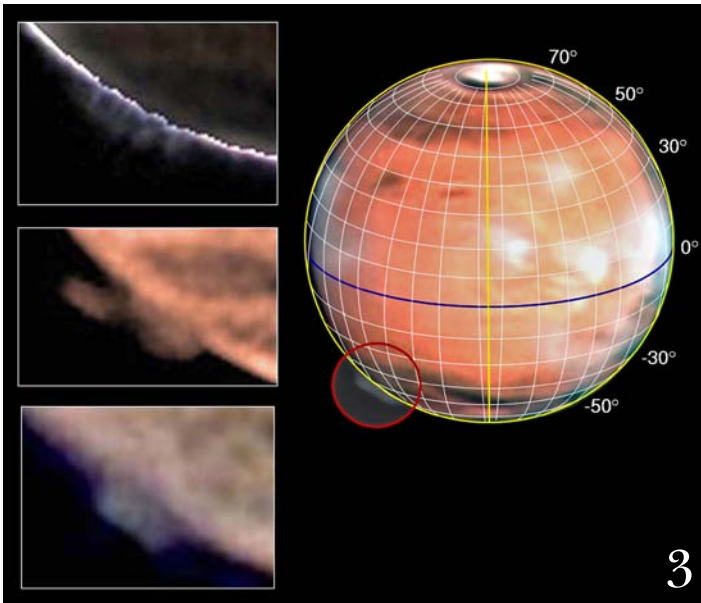
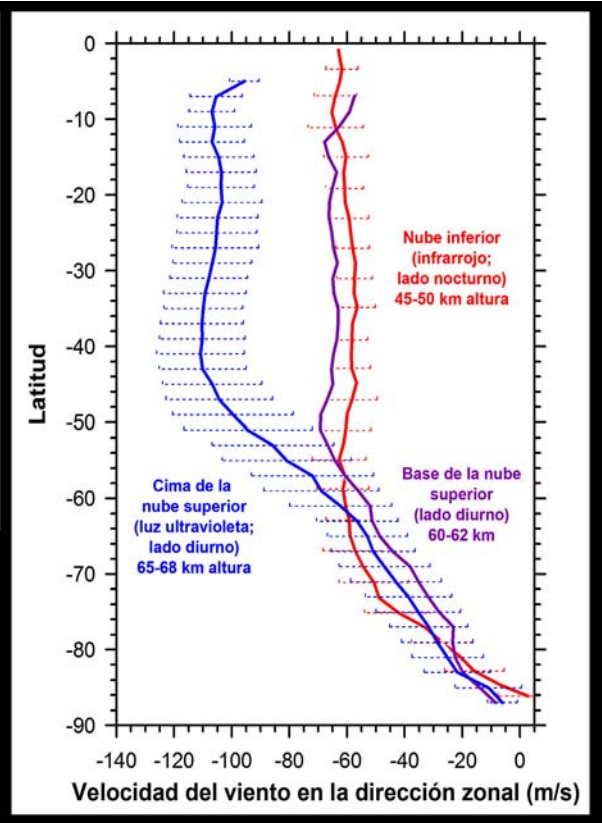
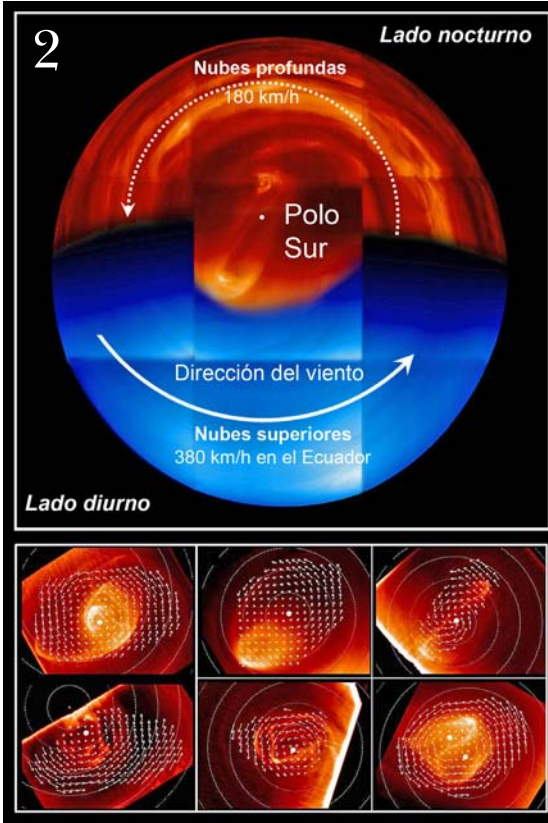


FIGURA 2. Observaciones de múltiples capas de nubes en Venus obtenidas por la misión *Venus Express* mostrando la dinámica atmosférica en diferentes alturas y las diferentes configuraciones del vórtice polar. Fuera de la región dominada por el vórtice los vientos son prácticamente zonales en la dirección de los paralelos y alcanzan velocidades máximas en la cima de las nubes.

FIGURA 3. Observación del evento ocurrido en el limbo de Marte en marzo y abril de 2012 y que alcanzó una altura extrema de 200-250 km. Las imágenes fueron tomadas por un amplio número de astrónomos amateur y publicadas en la revista *Nature* (febrero 2015).

también a nuestros estudios pioneros de caracterización y modelización de las gigantescas tormentas de escala planetaria como las erupciones de las bandas ecuatorial sur (SEB) y templada norte (NTB) en Júpiter o las erupciones de las grandes manchas blancas de Saturno (*Great White Spots*) que han permitido sondear la estructura dinámica de sus atmósferas al nivel y por debajo de las capas visibles de nubes. Las observaciones y modelos dinámicos han servido para caracterizar el comportamiento e interacciones mutuas de ciclones y anticiclones como la Gran Mancha Roja de Júpiter, o la fusión de los óvalos de larga vida para formar el anticiclón gigante BA (denominación introducida por el grupo). Nuestro grupo fue el primero en reportar las ondas circumpolares en la estratosfera polar de Júpiter, la presencia de un vórtice de intensa circulación en el polo sur de Saturno y las propiedades de las ondas y las cadenas de festones en el ecuador de Júpiter y la famosa onda hexagonal de Saturno. Los estudios dinámicos (tanto teóricos como observacionales) han venido acompañados también por un análisis exhaustivo de la distribución vertical de las nubes y aerosoles, de manera que en numerosas ocasiones hemos podido estudiar la estructura tridimensional de los fenómenos atmosféricos.

Mención aparte merecen los trabajos desarrollados por el Grupo de Ciencias Planetarias en el ámbito de impactos en Júpiter. Desde el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 en 1994, al impacto con Júpiter de un objeto de unos 500 m de tamaño ocurrido en julio de 2009 y descubierto por un astrónomo aficionado australiano (Anthony Wesley). Nuestro estudio sobre el nuevo impacto permitía establecer que Júpiter es bombardeado de manera más frecuente de lo esperado hasta entonces por estos impactos. Un año después, en junio de 2010, el mismo observador pudo detectar un breve flash de luz en la atmósfera de Júpiter. Nuestro análisis demostró que se trataba de un nuevo impacto, esta vez con un pequeño objeto de unos 10 metros de diámetro liberando suficiente energía como para ser observado desde la Tierra con un telescopio de 36 cm de diámetro. Otros impactos semejantes acontecidos en agosto de 2010, septiembre de 2012 y marzo de 2016 observados por varios aficionados han abierto un nuevo e interesante campo de investigación en el que participamos de manera destacada.

EL AULA ESPAZIO GELA Y SU OBSERVATORIO ASTRONÓMICO

El Aula Espazio Gela nació en 2008 en la Escuela de Ingeniería de Bilbao con el fin de implantar el Máster y el doctorado en Ciencia y Tecnología Espacial en la UPV/EHU. Se trata de un Aula propia con capacidad para impartir docencia a 25 alumnos cada uno con su puesto de ordenador, y tiene asociado un Observatorio Astronómico dotado con telescopios de 12 y 15 cm de diámetro para la observación solar, de 28 y 36 cm para la observación planetaria (este último ubicado actualmente en el Observatorio de Calar Alto y accesible de manera remota para investigación y docencia), y un 50 cm con capacidad de trabajar imagen y espectroscopia. Los alumnos realizan prácticas y trabajos con el material adquirido con estos instrumentos, lo que ha dado lugar a más de diez publicaciones internacionales de carácter docente y de investigación. Son ya más de un centenar los alumnos titulados en el Máster desde que tuvo lugar la primera edición en el curso 2009-10, muchos de ellos trabajando actualmente en el sector espacial o en investigación. El Aula está financiada por la Diputación Foral de Bizkaia y participan empresas como AVS, IDOM, SENER, Tecnalia, centros como el INTA, y la Agencia Espacial Europea (ESA). Visitar: www.ehu.es/aula-espazio.

PLANETCAM Y TELESCOPIO PLANETARIO EN CALAR ALTO

Con el ánimo de tener un instrumento propio avanzado para la toma de imágenes en alta resolución espacial y temporal, diseñamos la cámara PlanetCam UPV/EHU capaz de observar simultáneamente en el visible (0,38-1 micras) y el infrarrojo cercano (1-1,7 micras), en longitudes de onda de interés para los estudios de las atmósferas planetarias. La cámara funciona bajo el concepto de «lucky imaging» consistente en la toma rápida de secuencias de imágenes que, seleccionadas por su calidad y recentradas, forman la imagen final de alta resolución espacial. La versión de un canal fue fabricada por la empresa IDOM y la versión de dos canales por iTec Astronómica. La cámara ha sido probada en varios telescopios, si bien desde hace ya dos años está de forma operativa en el telescopio de 2,2 m del Observatorio de Calar Alto. Hasta la fecha se han publicado seis trabajos de investigación (otros tres están en curso) y hay una tesis doctoral en desarrollo basados en observaciones con PlanetCam. Desde finales de 2016 el GCP tiene instalado en el Observatorio de Calar Alto un telescopio Meade de 14" (36 cm) equipado con una cámara Zwo para la observación planetaria en el rango visible (modo «lucky imaging»). El telescopio es controlado remotamente y las primeras imágenes son altamente prometedoras, encontrándose actualmente bajo ajuste del control remoto.

Saturno observado por Cassini en 2011 en resolución media y alta

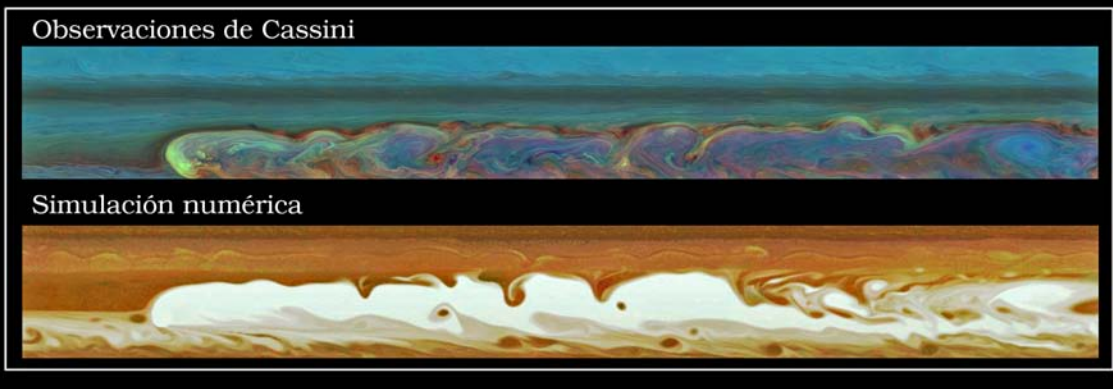
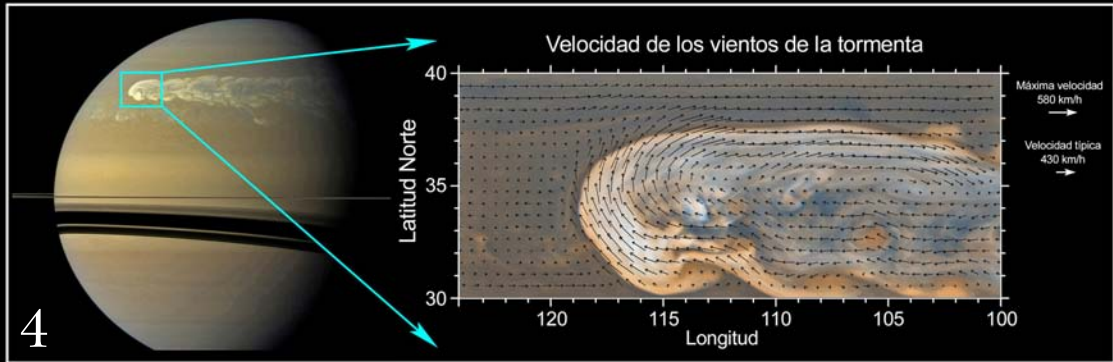


FIGURA 4. La Gran Mancha Blanca de Saturno de 2010 y 2011. Observaciones de la misión *Cassini*, medidas de velocidad de viento asociadas a la tormenta y comparación con simulaciones numéricas realizadas por el Grupo de Ciencias Planetarias.

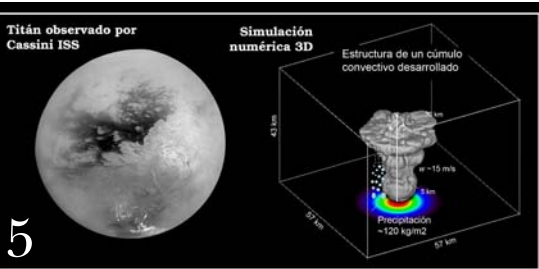


FIGURA 5. Actividad atmosférica en Titán, Urano y Neptuno. Tormentas convectivas en Titán y simulaciones numéricas de convección de metano en esta luna. Los paneles inferiores muestran observaciones de estructuras atmosféricas en Urano y Neptuno. Las estructuras más brillantes de ambas imágenes pudieron ser seguidas por diferentes observadores aficionados durante varios meses.

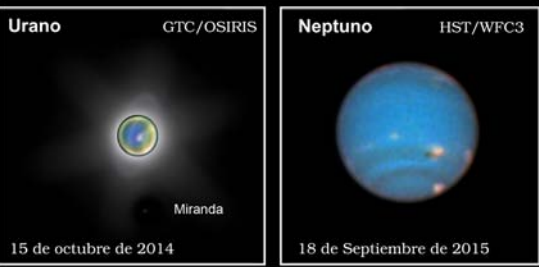
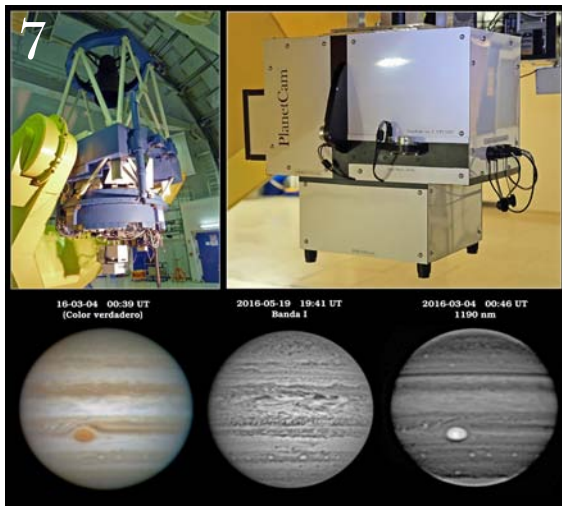




FIGURA 6. Aula Espacio Gela y parte del observatorio asociado. Objetos del cielo profundo como M 27 en la figura pueden observarse con el telescopio de 50 cm aún teniendo en cuenta la fuerte contaminación lumínica del cielo de Bilbao. Puede verse la colección de imágenes obtenidas con los telescopios del Aula en www.ehu.es/aula-espacio/imagenes.html.

FIGURA 7. La cámara PlanetCam instalada en el telescopio de 2,2 m del Observatorio de Calar Alto (Almería), y secuencia de imágenes del planeta Júpiter con ella obtenidas.



También ocasionalmente hemos realizado el seguimiento de estructuras nubosas en las atmósferas de Urano y Neptuno con todo tipo de telescopios incluyendo colaboraciones con aficionados a la astronomía. Finalmente, nuestro interés por los mundos extrasolares se ha centrado en el análisis comparativo de los exoplanetas gigantes, en la dinámica atmosférica prevista a partir de las propiedades globales determinadas en algunos de esos planetas y en el estudio de la magnitud de sus campos magnéticos. (A)

TITÁN, URANO Y NEPTUNO Y LOS EXOPLANETAS

La llegada de *Cassini* (NASA) a Saturno en 2004 y de la sonda *Huygens* (ESA) a Titán en 2005 proporcionó la visión más completa jamás obtenida de esta luna. *Huygens* fotografió un paisaje seco pero quebrantado por estructuras semejantes a cauces secos de ríos. Imágenes obtenidas desde Tierra o por *Cassini* mostraban el desarrollo ocasional de nubes brillantes de rápida evolución y lagos de hidrocarburos en las regiones polares. Utilizando un modelo numérico propio determinamos que estas nubes eran tormentas de metano capaces de producir grandes flujos de metano líquido sobre la superficie explicando gran parte de la orografía fluvial. Nuestro artículo, única participación del grupo hasta la fecha en Titán, fue publicado en la revista *Nature*.

Agradecimientos

Agradecemos a la Sociedad Española de Astronomía su invitación para escribir este artículo. El GCP agradece a los organismos públicos estatales (Ministerios, Gobierno Vasco, Diputación Foral de Bizkaia, Universidad del País Vasco UPV/EHU) y europeos (ESA, Europlanet 2020-RI), el apoyo financiero para desarrollar todas estas actividades.

Referencias

- * A. Sánchez Lavega *et al.*, «The Aula Espazio Gela and the Master of Space Science and Technology in the Universidad del País Vasco», *European Journal of Engineering Education*, 39, 518-526 (2014).
- * A. Sánchez Lavega, «El Aula Espazio Gela», Boletín SEA, 18-21, invierno 2014.
- * J. Lopesino, «Entrevista a A. Sánchez Lavega», *Astronomía*, No. 187, enero 2015.
- * A. Sánchez Lavega, «Apunte histórico sobre los estudios planetarios en España» en *50 años Escudriñando y Descifrando el Universo, homenaje al profesor Eduardo Battaner* (U. Granada, 2017).

Agustín Sánchez Lavega, Ricardo Hueso y Santiago Pérez Hoyos, astrónomos, son miembros del GCP-UPV/EHU.