

PLANETOLOGÍA Y CIENCIAS ESPACIALES ANTE LOS NUEVOS DESAFÍOS

Juan Gregorio Rejas Ayuga^{1,2,*}

¹Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Departamento de Programas Espaciales.
Ctra. de Ajalvir, km 4 s/n 28850 Torrejón de Ardoz (España),

²Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno.
Ramiro de Maeztu, 7, 28040 Madrid (España).

Recibido: 30/mayo/2020

Aceptado: 20/octubre/2020

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v13i1.11256>

RESUMEN

En las últimas décadas se ha profundizado en la investigación planetológica y en las Ciencias Espaciales a un ritmo acelerado y creciente. Los objetivos de desarrollar nuevas tecnologías espaciales y proporcionar una formación multidisciplinar basada en los últimos descubrimientos relacionados con las ciencias planetarias y espaciales, en particular en lo que se ha venido en denominar Observación de la Tierra, así como los de cubrir el vacío formativo sobre estas temáticas, se van cumpliendo sin resquicios. En la presente disertación se realiza una revisión mediante una metodología de documentación científica de los principales hitos de los últimos años y los retos asociados que ellos conllevan, junto a los desafíos de la humanidad a los que las ciencias espaciales deberían dar respuesta. Debemos ser conscientes de que nos encontramos en medio de una revolución tecnológica en el ámbito de las Ciencias Espaciales. Nunca tuvimos tantos datos que hayan dado tanta información que hasta hace no mucho desconocíamos sobre la Tierra, en muchas ocasiones indirectamente aportados a partir de la que conocemos de otros planetas, y viceversa. No obstante, nos enfrentamos así mismo a nuevos desafíos que tienen que ver en gran medida con los efectos del Cambio Climático sobre el ser humano, con las nuevas formas de relacionarnos con los recursos y con la tendencia a la robotización en las formas de producción. El otro aspecto relevante es que queremos ser capaces de predecir lo que depara el futuro, es decir anticiparnos y crear modelos que nos ayuden a mitigar y a desarrollar soluciones eficaces. Estamos, por lo tanto, ante una gran cantidad de desafíos de toda índole, técnicos, políticos y socioeconómicos asociados con el hecho de que la futura generación entienda el valor que tienen, entre otras las Ciencias Espaciales y Planetarias, en el hecho de encontrar las mejores soluciones.

Palabras clave: Ciencias Espaciales, Tecnologías Espaciales, Planetología, Cambio Climático, Desafíos.

*juangregorio.rejas@upm.es, rejasaj@inta.es

ABSTRACT

In recent decades, planetological research and Space Sciences have been deepened at an accelerated and growing rate. The objectives of developing new space technologies and providing a multidisciplinary training based on the latest discoveries related to planetary and space sciences, in particular in what has come to be called Earth Observation, as well as those of filling the educational gap on these thematic, they are fulfilled without loopholes. In this dissertation, a review is carried out through a scientific documentation methodology of the main milestones of recent years and the associated challenges that they entail, along with the challenges of humanity to which space sciences should respond. We must be aware that we are in the middle of a technological revolution in the field of Space Sciences. We have never had so much data that has given so much information that until not long ago we were unaware of the Earth, in many cases indirectly contributed from what we know of other planets, and vice versa. However, we also face new challenges that have to do largely with the effects of Climate Change on human beings, with new ways of relating to resources and with the trend towards robotization in forms of production. The other relevant aspect is that we want to be able to predict what the future holds, that is, anticipate and create models that help us mitigate and develop effective solutions. We are, therefore, facing a large number of challenges of all kinds, technical, political and socioeconomic associated with the fact that the future generation understands the value that Space and Planetary Sciences have, among others, in finding the better solutions.

Keywords: Space Sciences, Space Technologies, Planetology, Climate Change, Challenges.

1 *Introducción*

El desarrollo a día de hoy en Ciencias Espaciales y Planetología se debe en gran medida al desarrollo en la carrera espacial que se experimentó a partir de la década de los 60 del siglo XX. A lo largo del siglo pasado y en lo que llevamos de este, las Ciencias Espaciales y Planetarias, también llamadas Geociencias, han experimentado un desarrollo espectacular, unido indisolublemente al salto cualitativo y cuantitativo que ha experimentado en este mismo período la Tecnología en general y la Espacial en concreto (Rejas *et al.*, 2016). En el año 2018, por ejemplo, se cumplía uno de los hitos en la investigación espacial con el aniversario de la Estación Espacial Internacional que se lanzó y puso en órbita en 1998.

En relación con ello, hay que ser conscientes de que nos encontramos en medio de una revolución tecnológica en el ámbito de las Ciencias Espaciales. Nunca tuvimos tantos datos que aporten tanta información que hasta hace no mucho desconocíamos sobre la Tierra, en muchas ocasiones indirectamente aportados a partir de la que conocemos de otros planetas, y viceversa. Estos datos nos proporcionan una nueva visión, no sólo para la ciencia, sino también para las aplicaciones potenciales al servicio de nuestra sociedad, al comprender cómo funciona la Tierra como un sistema y al brindar una nueva generación de servicios de información. La relevancia en este sentido de las evidencias científicas generadas sobre esta base se incrementa por el alineamiento con las distintas políticas internacionales, que priorizan la comprensión global a través de la implementación de métodos científico-tecnológicos, cuantificando y modelizando los fenómenos (Crosta *et al.*, 2003; Méger *et al.*, 2019; Manolakis y Shaw, 2002; Malpica *et al.*, 2008; Schaum, 2005.)

El objetivo de desarrollar nuevas tecnologías espaciales y proporcionar una formación multidisciplinar basada en los últimos descubrimientos relacionados con las ciencias planetarias y espaciales, responde a un impulso internacional y a un esfuerzo global sobre la base de los resultados científicos alcanzados en

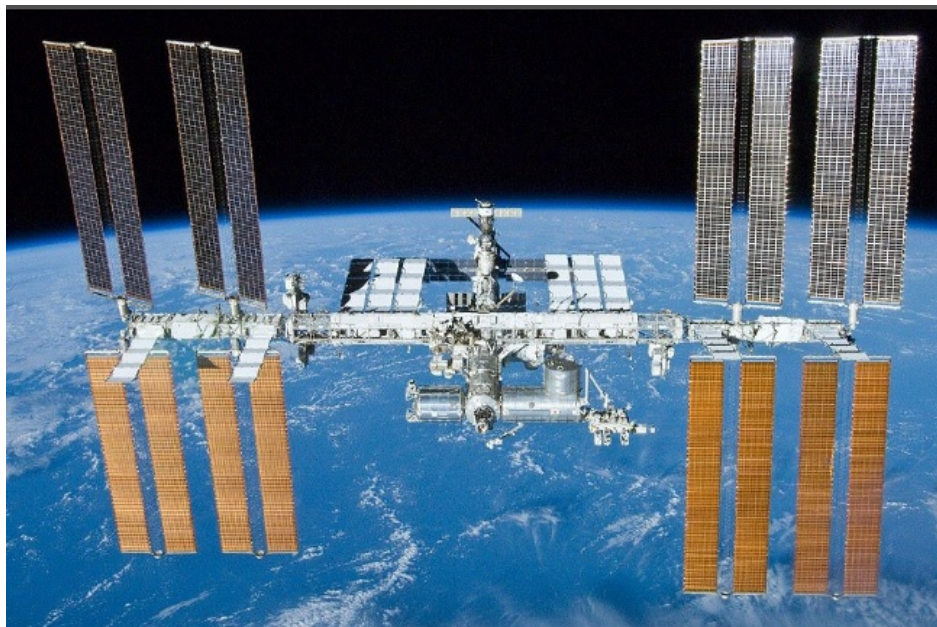


Figura 1: Aniversario en 2018 de la Estación Espacial Internacional. Tal día 20 noviembre 1998 se lanzó y puso en órbita Zarya, el primer módulo de la ISS. La imagen muestra la Tierra y el Espacio vistos desde la Estación Espacial Internacional.

las anteriores décadas. En particular, desde hace tiempo, pero especialmente con el inicio del siglo XXI, se ha experimentado un empuje en lo que se ha venido en denominar Observación de la Tierra, como respuesta a los retos mundiales que amenazan a las sociedades y al equilibrio del planeta y que cada vez se van acotando y conociendo de manera más precisa.

Estos aspectos tienen una implicación en lo relativo a una nueva visión y un incremento de información mejorada respecto décadas pasadas, no sólo en la ciencia, sino también para las aplicaciones al servicio de nuestra sociedad, al comprender cómo funciona la Tierra como un sistema y al brindar la nueva generación de servicios de información. En el presente artículo se realiza una revisión personal, no exhaustiva, mediante una metodología de documentación científica de los principales hitos en los últimos años y los retos asociados que ellos conllevan, junto a los desafíos de la humanidad a los que las Ciencias Espaciales deberán dar respuesta, fijándonos principalmente en lo concerniente al planeta Tierra.

2 Planetología y Astrobiología. Análogos Terrestres

Desde hace varias décadas se ha asentado otro aspecto a considerar en relación con el auge en la exploración de otros planetas. Organismos científicos tan relevantes como las agencias espaciales europea ESA (European Space Agency) o estadounidense NASA (National Aeronautics and Space Administration), se vienen planteando los aspectos relativos a la alteración físico-química y las metodologías no invasivas para la investigación de determinados espacios planetarios (Martínez-Frías *et al.*, 2012). Podríamos aventurar que se ha llegado a un punto de encuentro, con diferentes matices y controversias, sobre la necesidad de establecer protocolos y procedimientos consensuados para intentar no repetir fuera de la Tierra los errores cometidos en el pasado en nuestro propio planeta.

En lo relativo a tecnologías de prospección planetaria, existe una particular que impulsó a su vez la proyección planetológica en la propia Tierra, llamada espectrometría de imagen, mostrando su gran utilizada

en diversas aplicaciones prospectivas en las que el objeto de estudio es no accesible. Por ejemplo, se ha evidenciado ser eficiente en la caracterización de minerales basada en métodos estadísticos que utilizan bandas específicas de reflexión y absorción, lo cual es fundamental cuando nos encontramos con la necesidad de métodos remotos de exploración de otros planetas. Este proceso científico tiene un camino de vuelta, de tal manera que las evidencias que se alcanzan en Planetología retornan en forma de impulso científico para el avance en gran número de aplicaciones en nuestro propio planeta.

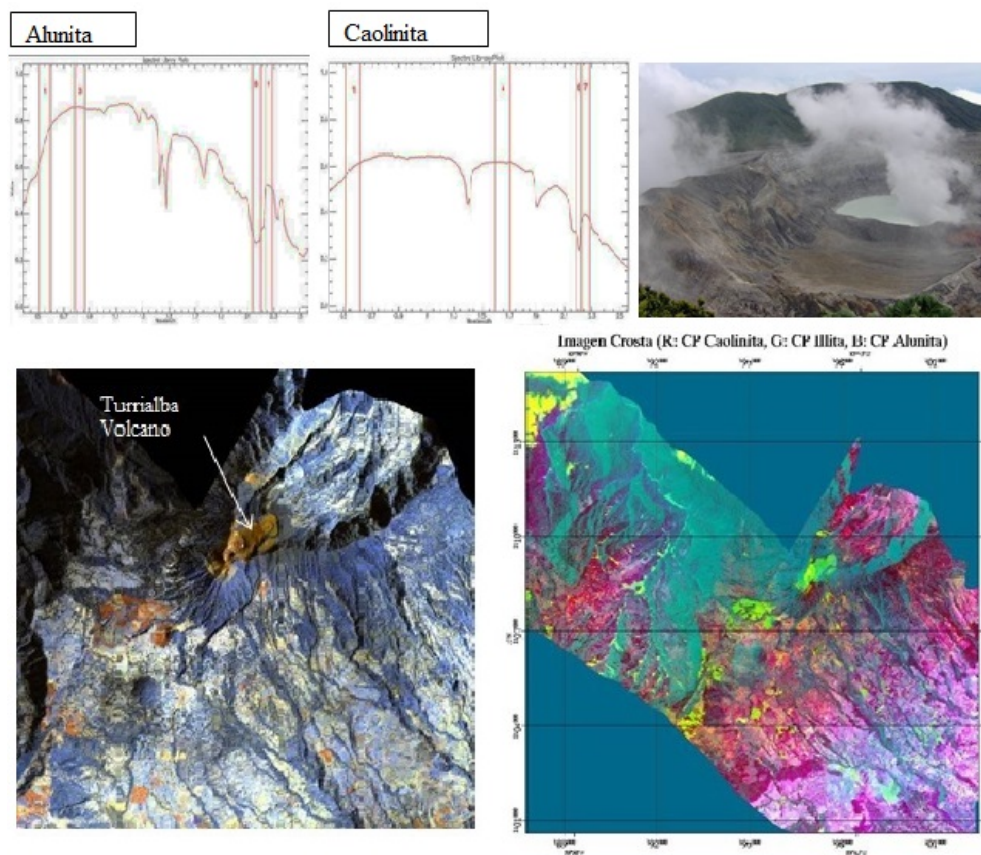


Figura 2: Ejemplo de aplicación de mapeo por espectrometría de imagen a partir de avión y de dron en el estudio de volcanes y potenciales análogos terrestres (Rejas *et al.*, 2012).

Un caso de éxito lo ha supuesto la aplicación de configuraciones multiespectrales en SWIR y VNIR (Visible-Infrarrojo cercano) para mapear materiales minerales de alteración hidrotérmica en diferentes escenarios geológicos terrestres y de otros planetas (Antón-Pacheco *et al.*, 2001; Cipar *et al.*, 2011; Crosta *et al.*, 2003). Una estrategia habitual de abordar los retos científicos que plantea la Planetología se materializa con los “Análogos Terrestres”, definidos en (Martínez-Frías, 2015) como “determinadas zonas de la Tierra que presentan características singulares y únicas, por su climatología, geomorfología, mineralogía, geoquímica, etc., que permiten utilizarlas como modelos para otros planetas”. En España, por ejemplo, se encuentran varios de los mejores y más estudiados Análogos Terrestres (Muñoz Aragón *et al.*, 2017), entre ellos Río Tinto en el Sureste de la Península Ibérica, Huelva, conjunto de explotaciones mineras desde época romana situado en la cuenca del Río Tinto, considerada como análogo de Marte por la composición mineralógica de sus tierras que, por atravesar el mayor depósito de sulfuros masivos del mundo (la Faja Pirítica Ibérica), presenta altos contenidos de sulfatos y óxidos de hierro (<https://noticiasdela ciencia.com/art/36504/el-subsuelo-de-rio-tinto-como-...1>).



Figura 3: Recogida de muestras de NASA Ames Research Center junto al Centro de Astrobiología en Río Tinto, España (Fuente: foto del Centro de Astrobiología-CAB, <https://www.cab.inta-csic.es>).

Este auge en investigación en Planetología ha permitido así mismo, incrementar el interés en el ámbito docente. Un ejemplo de ello es el Curso de Planetología y Astrobiología que en una modalidad en línea viene desarrollándose por el Ilustre Colegio de Geólogos de España (<https://www.icog.es>), nutrido por un conjunto interdisciplinar experto de profesores en las materias docentes.

3 Programas Espaciales de Observación de la Tierra

Tecnologías multispectrales e hiperspectrales, y sistemas activos como Lidar y Rádar se han utilizado en las últimas décadas con resultados científicos satisfactorios en lo que se ha venido en denominar Observación de la Tierra para estudiar y monitorear una gran cantidad de aplicaciones diferentes en la biosfera, geosfera, criosfera e hidrosfera, como lo es la deforestación, los incendios, la actividad volcánica, deslizamientos de tierra, terremotos, medio ambiente, contaminación, extensión del hielo marino, humedad del suelo o las inundaciones. La tecnología espacial para adquirir datos de imágenes con una resolución espacial y temporal cada vez mayor, con detalles cada vez más finos, ha mejorado drásticamente en las últimas décadas. Y eso permitió en concreto a la Teledetección explorar y comprender partes del sistema de la Tierra para medir el cambio de uso de la tierra, aplicaciones agrícolas, forestales y oceánicas, permitiendo entender a la sociedad que el alcance iba desde la gestión de la pesca hasta la seguridad alimentaria y la gestión de la energía. De esta manera tenemos la posibilidad de una visión global y potente desde el espacio sobre cómo nuestro planeta es un organismo vivo, sobre el ciclo del carbono, sobre el fitoplancton en el océano y la vegetación en la Tierra, y cómo estos dos interactúan como un sistema terrestre acoplado.

Lo que es realmente único en la Observación de la Tierra es que toca muchas disciplinas. Y es una especie de integrador entorno a un objetivo común, que es comprender nuestro planeta. Permite una imagen global y también un nivel de detalle nunca visto, que utiliza esta información para apoyar así mismo la toma de decisiones.

Ahora se tiene la capacidad de recopilar datos, transmitirlos digitalmente y casi instantáneamente a la Tierra. La tecnología de observación óptica de la Tierra ha permitido nuevas aplicaciones como planificación urbana, monitoreo de vehículos, mapeo de alturas de edificios en entornos urbanos, monitoreo de movimientos humanitarios o la observación de cambios detallados en el ambiente que podrían afectar la vida silvestre.

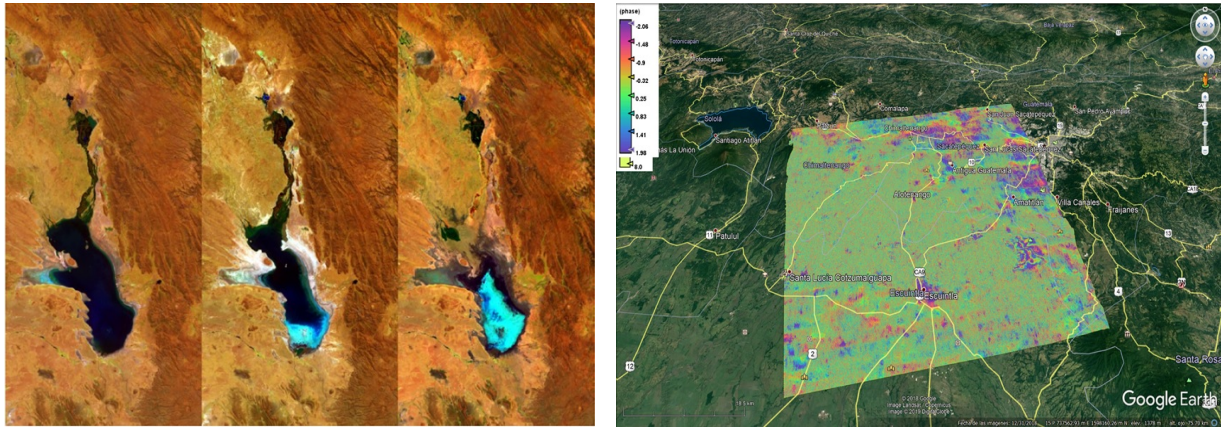


Figura 4: Evolución temporal del Lago Poopo entre 2014 y 2016 tomados por Proba-V (izq.). (Fuente: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2016/02/ProbaV_tracks_Lake_Poopo_evaporation). Evaluación de la deformación del terreno (en tonalidades moradas, rojas y azules zonas con mayor deformación) y el impacto del volcán de Fuego en Guatemala a partir de Interferometría Diferencial SAR por datos Sentinel 1 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) del programa europeo Copernicus (dcha.). (Fuente: Elaboración propia)

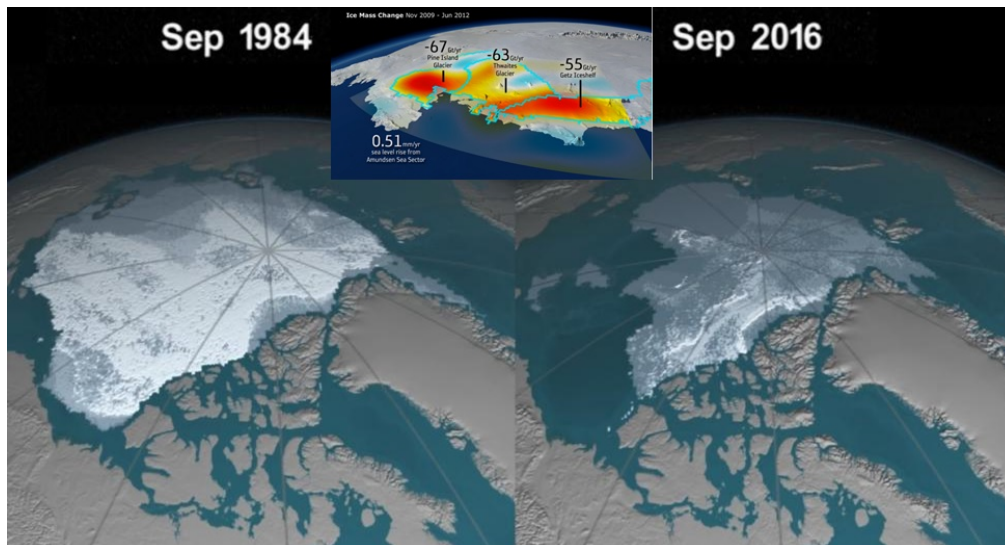


Figura 5: Evolución temporal obtenida por NASA de la masa de hielo en el Polo Norte de 1984 a 2016. (Fuente: <https://climate.nasa.gov/news/2510/see-how-arctic-sea-ice-is-losing-its-bulwark-against-warming-summers/>).

Los datos y técnicas de Observación de la Tierra, principalmente la Teledetección, han experimentado un auge y una madurez muy importantes en las décadas pasadas en lo concerniente a la Geosfera. En áreas de interés y conocimiento concretas como Terremotos, Actividad Volcánica y Deslizamiento de Laderas, las técnicas multifuente a partir de sensores activos y pasivos se han mostrado especialmente efectivas en el análisis y monitorización cada vez de manera más precisa y efectiva. Cabe destacar una de estas técnicas como lo es la Interferometría Diferencial a partir de imágenes radar o Radar de Apertura Sintética (SAR en sus siglas en inglés), técnica completamente validada y asentada en los protocolos y en las especificaciones habitualmente exigidas en ingeniería y análisis de riesgos por catástrofes naturales (Figura 4 derecha).

Otro de los efectos del Cambio Climático ampliamente estudiado y comprobado en décadas anteriores es el producido por el deshielo debido al aumento global de la temperatura en la Tierra (IPCC, 2007; IPCC, 2014). Los programas espaciales de investigación han demostrado la utilidad en el monitoreo de estos efectos asociados al Cambio Climático y focalizados principalmente en los polos terrestres, tanto expresados por el deshielo como por el agujero de la capa de ozono. En la Figura 5 se observa los resultados evidentes en 32 años del deshielo en el Polo Norte obtenidos por NASA.

Grandes áreas de la Tierra, que por su importancia medioambiental y por su extensión y relativa estabilidad ecológica, suponen indicadores globales de la salud del planeta, como puedan ser La Amazonía, Siberia, la Antártida y el Círculo Polar Ártico, han estado en el punto de mira de la comunidad científica por su relevancia sobre el Planeta Tierra, y se vienen estudiando ingentemente por las Ciencias Planetarias y Espaciales desde mediados del siglo XX. Podemos observar en las Figuras 4 (izquierda), 5 y 6 (izquierda) algunos ejemplos de ello.

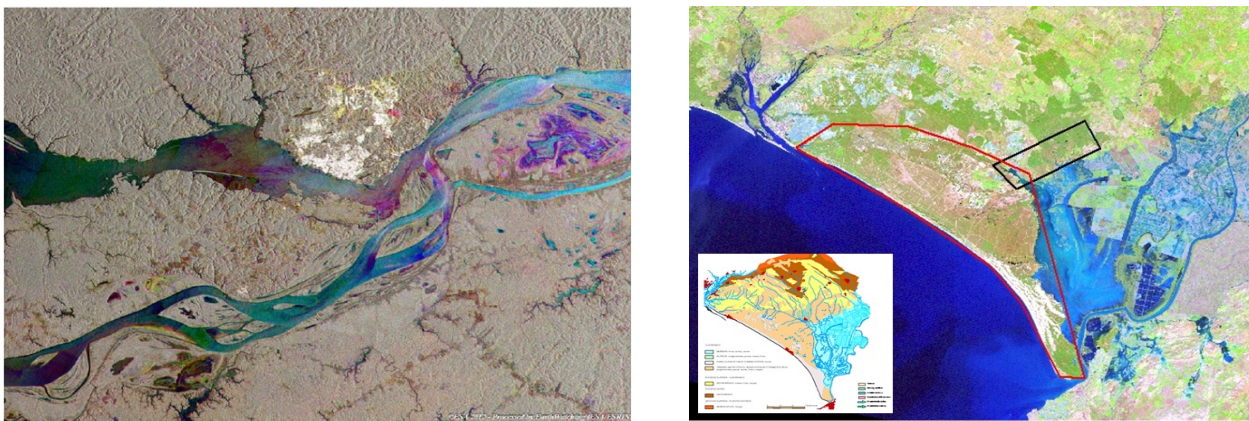


Figura 6: Análisis de la deforestación en el Amazonas (izq) a partir de datos de radar detectadas por polarimetría diferencial SAR zonas de pérdidas de masa forestal (en tonalidades blancas). (Fuente: https://earth.esa.int/web/earth-watching/special-events/content/-/asset_publisher/CrWyoA6dWnwI/content/amazon-rainforest-deforestation-brazil-).

Estudio y monitoreo medioambiental de los humedales mediante teledetección multispectral que permite caracterizar y separar láminas de aguay vegetación arbustiva en el Parque Nacional de Doñana (derecha), uno de los principales ecosistemas europeos en Huelva, al sur de España, a partir de tecnologías espaciales e in situ (Antón-Pacheco *et al.*, 2001)

Otro gran ámbito de estudio que afecta a nuestro planeta es la Hidrosfera. La actualización en la investigación sobre la humedad del suelo (Figura 6 derecha), las inundaciones o las corrientes oceánicas, relacionadas a su vez con los efectos del Cambio Climático, ha focalizado desde hace tiempo la atención de la comunidad científica, por el impacto en la obtención de evidencia científica, así como, principalmente, por su repercusión sobre la salud y la gestión del riesgo hacia la sociedad.

4 Sistemas GNSS/INS, RPAS y Drones

La navegación mediante GNSS/INS, Sistemas de Navegación Global y Sistemas de Navegación Inercial, respectivamente en sus siglas en inglés, comprende un largo proceso de flujo de información en el que están involucradas la adquisición, sincronización, procesado, integración y transformación de las medidas de los datos de ambos subsistemas en parámetros de navegación. En este sentido, la incorporación en los años 80 del siglo pasado del sistema de posicionamiento global GPS (Global Positioning System) en los procesos de navegación supuso una importante mejora. Se ha mostrado como un sistema eficaz y se ha comprobado su compatibilidad, proporcionando de manera precisa y directa la posición de los centros perspectivos de las trayectorias en plataformas terrestres, aéreas y espaciales.



Figura 7: El programa Horizon 2020 lanza nuevas aplicaciones europeas de navegación GNSS. (Fuente: <https://www.gsa.europa.eu/r-d/h2020/introduction>).

A este importante avance se ha unido en los últimos tiempos el considerable desarrollo de la tecnología inercial, siendo destacable en este terreno las investigaciones llevadas a cabo por el grupo de trabajo “Integrated Sensor Orientation” de la OEEPE (Heipke *et al.*, 2001a; Heipke *et al.*, 2001b; Heipke *et al.*, 2002) formado por colaboración de distintos organismos europeos y empresas fabricantes. En 2001 este grupo presentó los resultados de diversos test o ensayos como respuesta a la madurez alcanzada por la tecnología inercial en combinación con GPS en navegación y orientación directa de sensores.

Este impulso en la investigación en GNSS/INS se ha visto respaldado con el desarrollo a nivel internacional de nuevos sistemas de posicionamiento global como es el sistema europeo Galileo, y de sistemas espaciales de aumentación, sistemas que aumentan la integridad y la precisión de los sistemas GNSS como son EGNOS, WAAS, SDCM, GAGAN, MSAS, ZSS-SAIF, lo que redundará en una mejora de la operatividad global de la navegación y de la geolocalización a nivel mundial.

Hoy en día y en un futuro próximo, la navegación basada en los actuales sistemas inerciales combinados con GNSS puede ser objeto de interferencias, engaño, o denegación intencionada en caso de que estos sistemas sean ajenos a nuestro control, como sucede con el actual GPS.

Se vislumbra como consecuencia, la conveniencia de explorar nuevas técnicas que habiliten la navegación segura de aeronaves, especialmente RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System) o drones. Uno de los retos en GNSS y drones será en el futuro próximo, será el procesamiento y almacenamiento de la gran cantidad de información que estos sistemas producen, y el desarrollo de sistemas pasivos que puedan ayudar a la función esencial de navegación cuando los métodos actuales pueden ser objeto de intrusión o perturbación no intencionada. También supone un reto en este ámbito la posible utilización de sistemas activos, como el Radar de Apertura Sintética y los propios sensores principales de los vehículos para una dedicación parcial a la navegación bajo situaciones de perturbación transitoria de señal GNSS.

5 Nuevos Desafíos

A pesar, o más bien gracias al ingente impulso de la Planetología y las Ciencias Espaciales en las pasadas décadas, nos enfrentamos así mismo a nuevos desafíos que tienen que ver en gran medida con los efectos del Cambio Climático sobre el ser humano, con las nuevas formas de relacionarnos con los recursos, con el almacenamiento, seguridad y procesamiento de las cantidades ingentes de datos e información que los nuevos sistemas espaciales producen y con la tendencia a la robotización en las formas de producción. Queremos saber lo que está pasando, y también queremos saber cómo reaccionar a los problemas que el Cambio Climático u otras cuestiones medioambientales imponen porque, aunque la incidencia pueda ser local, los problemas se comprueban globales. Uno de los retos en Planetología quizás más importantes será el estudio del Sol, la exploración del sistema Solar, empezando por la Luna y la prospección para su habitabilidad a corto plazo (Hayne *et al.*, 2020; Honniball *et al.*, 2021), o de los efectos del Tiempo Espacial sobre la Tierra, a lo que hay que añadir otro reto importantísimo de consecuencias todavía desconocidas, como es la posible llegada a Marte del hombre en las próximas décadas del presente siglo.

El otro aspecto relevante es que queremos ser capaces de predecir lo que depara el futuro, es decir anticiparnos y crear modelos que nos ayuden a mitigar y a desarrollar soluciones eficaces. Estamos, por lo tanto, ante una gran cantidad de desafíos de toda índole, técnicos, políticos y socioeconómicos asociados con el hecho de que la futura generación entienda el valor de entre otras, las Ciencias espaciales y Planetarias tiene en el hecho de encontrar las mejores soluciones y de la formación y docencia adecuada en estas materias.

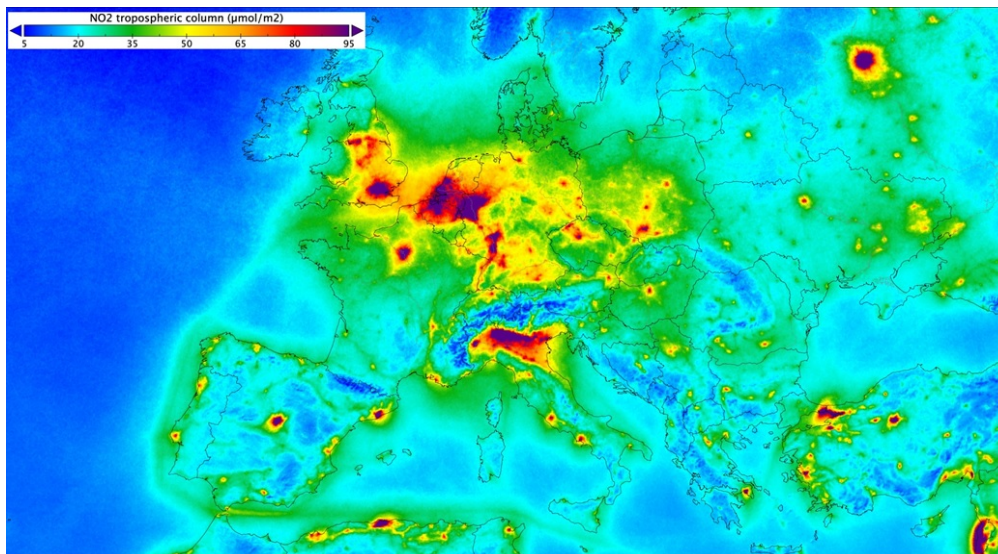


Figura 8: Análisis de la contaminación del aire a partir de datos del Sentinel-5P del programa europeo Copernicus. Las emisiones de dióxido de azufre han aumentado considerablemente en los últimos diez años, sin embargo, con la pandemia del COVID-19, la actividad humana e industrial se redujo considerablemente desde el inicio de su cierre en marzo del 2020, lo que se manifiesta en nuevos mapas que muestran la caída de las concentraciones de dióxido de azufre (Fuente: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Sentinel-5P_muestra_la_contaminacion_del_aire).

Un ejemplo de un retorno de las Tecnologías y Ciencias Espaciales a la sociedad, de gran actualidad debido a la crisis sanitaria mundial producida por el COVID19 a finales de 2019, es la monitorización de la contaminación de todo tipo de manera cada vez más precisa y asidua. Sobre la base de las mediciones recogidas por la misión Copernicus UE # Sentinel-5P entre abril de 2018 y marzo de 2019, se muestra en

la Figura 8 un ejemplo de ello, donde se muestra el dióxido de nitrógeno calculado para Europa en esa franja de tiempo. El dióxido de nitrógeno contamina el aire principalmente como resultado del tráfico y la combustión de combustibles fósiles en procesos industriales. Tiene un impacto significativo en la salud humana, contribuyendo particularmente a los problemas respiratorios.

La contaminación del aire es un problema de salud ambiental global, especialmente para quienes viven en áreas urbanas. Debido al COVID19 y al confinamiento de la población que en la mayoría del globo ha conllevado, se ha comprobado cómo la actividad humana afecta negativamente en la calidad del aire que podemos monitorizar con precisión desde el espacio, lo cual sin lugar a dudas sirve a la toma de decisiones.

6 Conclusiones

Las Ciencias Espaciales y la investigación Planetológica han profundizado a un ritmo acelerado y creciente en las últimas décadas, en particular en lo que se ha venido en denominar Observación de la Tierra, así como la formación en esta materia multi e interdisciplinar. Ha experimentado un auge de impacto debido a los resultados científicos de las experiencias en el siglo XX.

Nunca tuvimos tantos datos que aporten tanta información que hasta hace no mucho desconocíamos sobre la Tierra, en muchas ocasiones indirectamente aportados a partir de la que conocemos de otros planetas, y viceversa. Estos datos nos proporcionan una nueva visión, no sólo en ciencia, sino también para las aplicaciones potenciales al servicio de nuestra sociedad, al comprender cómo funciona la Tierra y al brindar una nueva generación de servicios de información.

Nos encontramos ante nuevos desafíos que tienen que ver en gran medida con los efectos del Cambio Climático, con las nuevas formas de relacionarnos con los recursos, con el almacenamiento, seguridad y procesamiento de cantidades cada vez más ingentes de datos e información y con la tendencia a la robotización en las formas de producción. Queremos saber lo que está pasando, y también queremos saber cómo reaccionar a los problemas que el Cambio Climático u otras cuestiones medioambientales imponen.

El otro aspecto relevante es que queremos ser capaces de predecir lo que depara el futuro, es decir anticiparnos y crear modelos que nos ayuden a mitigar y a desarrollar soluciones eficaces. Estamos por lo tanto ante una gran cantidad de desafíos de toda índole, técnicos, políticos y socioeconómicos asociados con el hecho de que la futura generación entienda el valor de las Ciencias Espaciales y Planetarias y obtenga una adecuada formación en ellas. Se mejorará en el futuro la recopilación de la información y la obtención de resultados, pero en estos momentos existe suficiente, el principal reto será explotar eficientemente esa información y dar un retorno de y para la sociedad, es decir, hacer que el conjunto social sea protagonista.

7 Agradecimientos

El autor desea agradecer al INTA (Instituto Nacional de Tecnología Espacial), a la ESA (Agencia Espacial Europea), a la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE.UU.), a los Programas Europeos Copernicus y GNSS Galileo, y al USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) por proporcionar los datos e información en la que se ha basado este artículo.

Este artículo es producto de la ponencia impartida bajo el mismo título en el 1er Congreso de Ciencias Espaciales desarrollado por la Universidad Autónoma Nacional de Honduras, organizado por su Facultad de Ciencias Espaciales.

El presente trabajo ha sido parcialmente apoyado en la experiencia de investigación de entre otros, los grupos: GIMCC-Grupo de Investigación Mesoamericano en Cambio Climático (Grupo Mesoamericano de Investigación sobre el Cambio Climático) y SECFT (Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección).

8 Referencias

Antón-Pacheco, C., Rowan, L., Mars, J., y Gumiel, J. (2001). Characterization of mine materials and hydrothermally altered rocks in the rio Tinto minning districy (southwest Spain) using HyMAP data. *Revista de Teledetección*, (16):65–68.

Cipar, J., Anderson, G., y Cooley, T. (2011). Active volcano monitoring using a space-based short-wave infrared imager. *Proceedings WHISPERS 2011, Lisbon (Portugal) 6-9 June 2011*.

Crosta, A., Filho, de Souza, C. R., Azevedo, F., y Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposit in patagonia, argentina, using aster imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 10:4233–4240.

Hayne, P., Aharonson, O., y Schörghofer, N. (2020). Micro cold traps on the moon. *Nat Astron.* <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1198-9>.

Heipke, C., Jacobsen, K., y Wegmann, H. (2001a). OEEPE test on integrated sensor orientation – status report.

Heipke, C., Jacobsen, K., y Wegmann, H. (2002). Integrated sensor orientation test report and workshop proceedings. European Organization for Experimental Photogrammetric Research-OEEPE. Published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. Printed by Werbedruck Schreckhase, Spangenberg.

Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., y Nilsen, Barbi (2001b). Integrated Sensor Orientation – An OEEPE Test.33.

Honniball, C., Lucey, P., Li, S., Shenoy, S., Orlando, T., Hibbits, C., Hurley, D., y Farrell, W. (2021). Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA. *Nature Astronomy*, 5:121–127. <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x>.

IPCC (2007). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Editado por R. Pachuri y A. Reiseinger. Ginebra. doi: 10.1109/MELCON.2008.4618473.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.

Malpica, J., Rejas, J., y Alonso, M.-C. (2008). A projection pursuit algorithm for anomaly detection in hyperspectral imagery. *Pattern Recognition*, 41(11):3313–3327, ISSN 0031–3203.

Manolakis, D. y Shaw, G. (2002). Detection Algorithms for Hyperspectral Imaging Applications. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1):29–43.

Martínez-Frías, J. (2015). Análogos terrestres. marte... y más allá.

Martínez-Frías, J., González, J., y Rull, F. (2012). Geoethics and Deontology. From Fundamentals to applications in Planetary Protection. *Episodes*, 34(4):257–262.

Muñoz Aragón, L., García Baonza, V., y Martínez-Frías, J. (2017). Geodiversidad y geociencias planetarias análogos de marte en españa. Análogos de Marte en España. *Tierra y Tecnología* n° 50.

Méger, N., Rigotti, C., Pothier, C., Nguyen, T., Lodge, F., Gueguen, L., Andréoli, R., Doin, M. P., y Datcu, M. (2019). Ranking evolution maps for satellite image time series exploration: application to crustal deformation and environmental monitoring. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 33:131–167.

Rejas, J., Martínez-Frías, J., Gómez, F. J., Bosque, J., Maza, F., Soriano, M., Dalda, A., Bermúdez, J., Rodríguez, M. G., Goycoolea, R., Alonso, M., y Rodríguez, V. (2016). Geoética y medioambiente. Experiencias Aprendidas Sobre una Base Ética de las Geociencias. Congreso REIMA (Red Iberoamericana Del Medio Ambiente), Tegucigalpa 2016.

Rejas, J. G., Martínez-Frías, J., Bonatti, J., Martínez, R., y Marchamalo, M. (2012). Anomaly detection and comparative analysis of hydrothermal alteration materials through hyperspectral multisensor data in the turrialba volcano. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B7:151–155.

Schaum, A. (2005). Hyperspectral detection algorithms: Operational, next generation, on the horizon. Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR05). <http://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.