

Inversiones de CO₂ en la termosfera diurna de Marte a partir de emisiones limbo en 4.3μm

Autor: Sergio Jiménez-Monferrer

Tesis doctoral dirigida por: Miguel Ángel

López-Valverde y Bernd Funke

Centro: Universidad de Granada (lectura en IAC)

Fecha de lectura: 4 de octubre de 2019

A pesar de la importancia de la termosfera, es quizá la región menos conocida de la atmósfera marciana. La mayor parte de la información que tenemos sobre estas alturas proviene de fuentes muy dispersas e inconexas entre sí. Entre ellas, unos pocos perfiles tomados *in situ* durante el descenso de algunas misiones, como *Viking 1* y *2*, las maniobras de aerofrenado de las misiones *Mars Global Surveyor* y *Mars Reconnaissance Orbiter*, el instrumento SPICAM a bordo de *Mars Express* y los instrumentos a bordo de la misión MAVEN. Estas medidas permitieron obtener perfiles de densidad y temperatura y estudiar la variabilidad estacional y geográfica de la termosfera. Según estas observaciones y las simulaciones numéricas de las mismas, la termosfera de Marte es una región compleja y dinámica, fuertemente acoplada a las capas inferiores. En concreto, los efectos causados por las tormentas de polvo y la variabilidad térmica en la baja atmósfera se propagan hacia arriba, llegando hasta la termosfera. Para comprender esta región hace falta, por lo tanto, una visión global de la atmósfera, desde las interacciones con la superficie hasta los intercambios de especies con la exosfera.

Los datos termosféricos disponibles presentan una cobertura temporal y geográfica limitada. Algunos efectos importantes, como la influencia de la actividad solar, son difíciles de entender con dichos datos. La mayoría de ellos, excepto las medidas de aerofrenado, se concentran en la parte nocturna del planeta, lo que deja la termosfera diurna prácticamente inexplorada. Durante el día es cuando se producen las emisiones atmosféricas no térmicas más fuertes en el infrarrojo. Estas emisiones infrarrojas ofrecen una interesante oportunidad para el sondeo remoto a dichas alturas en los planetas terrestres. De hecho, existen observaciones termosféricas de Marte en el infrarrojo, pero esos datos no han sido explotados suficientemente hasta la fecha debido a la complejidad de su interpretación física y la dificultad numérica de la inversión matemática necesaria. Estas observaciones fueron obtenidas por dos instrumentos a bordo de *Mars Express*: OMEGA y PFS. Se espera que su análisis proporcione un conocimiento más amplio y profundo sobre la termosfera diurna a las alturas de su máxima sensibilidad.

Como hilo conductor entre las misiones *Mars Express* y *ExoMars* (que comienza a producir los primeros resultados científicos), el proyecto europeo UPWARDS (*Understanding Planet Mars With Advanced Remote-sensing Datasets and Synergistic Studies*) arrancó en 2015, en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea. UPWARDS tenía como objetivo componer una imagen global de Marte, desde el subsuelo hasta la alta atmósfera. El proyecto UPWARDS abarcaba el desarrollo de nuevas herramientas científicas para el análisis de datos orbitales, como los que se esperan de

ExoMars, así como el estudio de datos existentes no explotados, como los proporcionados por *Mars Express*. El trabajo presentado en esta tesis ha sido parcialmente financiado por UPWARDS. Hemos analizado las emisiones infrarrojas de CO₂ en la región alrededor de 4.3 μm, obtenidas por OMEGA en geometría limbo en la termosfera diurna de Marte, con el objetivo de inferir información sobre parámetros atmosféricos fundamentales, como densidad y temperatura. Estas emisiones se producen por fluorescencia de la radiación solar por parte del CO₂ y es necesario incorporar condiciones de no ETL. Hemos realizado la calibración radiométrica de los datos proporcionados por OMEGA, limpiado los espectros disponibles, incluyendo el uso de técnicas de agrupamiento, y generado perfiles verticales de radiancia para cada conjunto de datos orbitales. La distribución y la geometría de los espectros obtenidos por OMEGA son altamente heterogéneas, dando lugar a proyecciones muy diferentes en el limbo de la atmósfera marciana. Por este motivo, se estableció una serie de criterios geométricos para facilitar una posterior comparación consistente entre los resultados de las inversiones.

Tras generar los perfiles verticales de radiancia, hemos aplicado un esquema de inversión no ETL basado en un esquema ampliamente validado para la Tierra, que adaptamos a condiciones marcianas. En este trabajo se presenta la configuración de la inversión y una discusión sobre los perfiles de densidad de CO₂ invertidos. También se formaron un total de 742 perfiles a partir de las 47 órbitas de OMEGA con observaciones en geometría limbo previamente seleccionadas. La convergencia alcanzada para el conjunto de todos los datos fue del 94%, resultado que puede considerarse muy satisfactorio. A partir de las densidades de CO₂ invertidas derivamos perfiles de temperatura, asumiendo equilibrio hidrostático. Para ello, usamos un algoritmo desarrollado a tal efecto. Para el 60% de las órbitas analizadas, encontramos un mínimo en el perfil de temperaturas a 140–150 km, lo que indica una termosfera más fría que la del modelo empleado, el LMD-MGCM. Por el contrario, en el 30% de las órbitas se obtuvo una termosfera más caliente que la predicha por el modelo.

Se incorpora también un estudio exhaustivo de sensibilidad del esquema de inversión. Hemos encontrado que, en general, la incertidumbre debida a la calibración de la ganancia instrumental y la inherente al error de la inversión son de especial importancia, mientras que la influencia de las temperaturas en la atmósfera de referencia usada como a priori, tomada de nuestro modelo de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés), es menor. Según nuestro estudio, los perfiles de CO₂ se pueden derivar con una precisión de aproximadamente 20% y una resolución vertical de unos 15 km entre 120 y 160 km de altura tangente.

Finalmente, hemos comparado los perfiles de densidad y temperatura obtenidos con las predicciones del LMD-MGCM y con los resultados proporcionados recientemente por otros instrumentos que estudian la termosfera marciana. La mayoría de las observaciones provenientes de otros experimentos, como medidas *in situ* de NGIMS o remotas de IUVS (ambos a bordo de MAVEN), tienen incertidumbres del mismo orden que las presentadas en este trabajo. Los resultados de dichos experimentos también ponen de manifiesto diferencias importantes cuando se comparan al LMD-MGCM o a otros modelos de circulación general. Dicha comparación global con las simulaciones numéricas indica una variabilidad atmosférica en consonancia con la encontrada también en nuestros datos de OMEGA. Este resultado apunta a la necesidad de validación de modelos globales a alturas termosféricas.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1791123>