

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Variabilidad atmosférica en Marte y la Tierra inducidas por la actividad solar

Johan Nicolás Molina Córdoba^{1,*}, Santiago Vargas Domínguez¹ y Jorge Ivan Zuluaga Callejas²

¹Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia ; ²Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

*Estudiante de Maestría en Ciencias - Astronomía (jomolinac@unal.edu.co)

Resumen

En este trabajo se presentan resultados preliminares del estudio de correlación entre atmósferas planetarias (Tierra y Marte) y flujo energético solar en radio a $\lambda = 10.7$ cm. En particular, se esbozan resultados de análisis de *proxies* que permiten hacer estimaciones de la densidad de agua atmosférica en las diferentes capas de la atmósfera intermedia y baja de Marte. Para el caso de la Tierra se emplea información del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) a través del modelo empírico NRLMSISE 00, donde se obtienen datos de abundancias de N_2 , O_2 , N, H_2 , Ar y He en una ventana temporal de 1961-2021 a 55 y 105 km de altura. Para la caracterización de la variabilidad en la atmósfera marciana se toman datos registrados por el instrumento SPICAM de la sonda *Mars Express* en una ventana de tiempo de 2004-2018. Los datos de flujo solar son obtenidos también del modelo empírico NRLMSISE 00. La propuesta se consolida en el ámbito de las ciencias planetarias, que involucra el clima espacial y las condiciones astrobiológicas en el entorno solar, dando esbozos sobre la importancia de contemplar la búsqueda de modelos climatológicos a escala del Sistema Solar, que den cuenta de conexiones y sinergias entre los cambios que experimentan los planetas asociados a la variabilidad solar durante el ciclo de actividad de la estrella. Los resultados manifiestan la existencia de correlación entre grados de concentración de diferentes especies químicas de las atmósferas para los dos sistemas planetarios estudiados y la señal de flujo solar.

Palabras clave: Atmósferas Planetarias; Marte; Ciclo Solar; Modelos Climatológicos; NRLMSISE 00; Clima Espacial.

1. Introducción

En el contexto de estudio de las atmósferas planetarias, el envío de sondas espaciales orbitales en las atmósferas de distintos planetas del sistema solar (incluida la Tierra) desde la década de 1960, ha sido fundamental para reconocer la variabilidad atmosférica asociada a diferentes fenómenos, por ejemplo, ciclos estacionales (Woiceshyn, 1974), actividad magnética, o estados de ionización en la ionosfera producidos por la incidencia de la radiación UV proveniente del Sol (Tian et al., 2022). En el marco de estudio de la caracterización atmosférica de un planeta, su composición química es un aspecto de especial interés en la investigación, tanto como insumo de conocimiento para

estudiar posibles condiciones de habitabilidad o posibles *proxies* que determinan si en algún momento dado, un planeta fue habitable.

De los modelos conocidos actualmente en el estudio de Marte, se identifica que al igual que como ocurre en la Tierra, la atmósfera superior marciana se ioniza principalmente por la incidencia de radiación UV proveniente del Sol (Tian et al., 2022), y la ionosfera se constituye de picos de densidad electrónica a lo largo de 120 km de columna vertical exterior de la atmósfera marciana (Haider et al., 2011). En los perfiles espaciales y temporales hay varios niveles donde coexiste la atmósfera neutra con iones de diferentes especies químicas. Por otro lado, Marte tiene

una región bien mezclada de la homósfera con la homopausa a 120 km de altitud. La termosfera se define como la región por encima de la cual los gases se separan difusivamente con especies químicas individuales, siguiendo sus alturas de escala. Finalmente esta región se fusiona con la exósfera, donde los gases más livianos pueden energizarse para alcanzar velocidades de escape. Por lo general, este proceso de pérdida comienza alrededor de los 220 km de altura llamado exobase, donde las alturas de escala y los caminos libres medios son comparables. La dinámica de esta región está impulsada por los flujos de energía y momento rotacional de los planetas, además de las ondas de marea que se propagan a través de la atmósfera inferior (Kamsali et al., 2021). Por efectos de la radiación solar ultravioleta extrema (EUV), en la atmósfera inferior se introducen partículas energéticas inducidas por llamaradas y plasma de viento solar de flujo variable (Petrosyan et al., 2011).

En general, se han encontrado con diferentes grados de abundancia, diversas especies químicas como Ar, H, O, N, CO₂ y H₂O en Marte (Franz et al., 2017; Haberle, 2015; Economou, 2008). Estas diferentes especies caracterizan la composición de las atmósferas tanto de la Tierra como de Marte, que varían, según lo conocido, de acuerdo con periodos estacionales relacionados con el movimiento orbital de estos dos cuerpos celestes.

Entre las sondas características que han rastreado la atmósfera de Marte, la misión de exploración *Mars Express* es una de las más antiguas y que aún está en funcionamiento (Chicarro, 1999). Esta acumula un tiempo de almacenamiento de datos que pueden ser procesados para la derivación de perfiles de densidad de distintas especies químicas en la atmósfera de Marte equivalente a 18 años. En esta investigación se retoman datos derivados en el trabajo de Fedorova et al. (2021). Estos son datos de abundancias de vapor de agua, reproducidos a partir de imágenes espectroscópicas obtenidas a través del canal infrarrojo del instrumento científico incorporado en *Mars Express*, SPICAM (*Ultraviolet and Infrared Atmospheric Spectrometer*) por el método de ocultación estelar. Esta técnica consiste en la determinación de la transmisión atmosférica de la luz proveniente de una estrella, a varias altitudes sobre la superficie de un planeta (Montmessin et al., 2006).

Para los resultados de correlación de esta entrega preliminar de la investigación se analizaron en el caso de Marte, perfiles de abundancias y densidades de vapor de agua con datos procesados de SPICAM de *Mars Express*. Y en el caso de la Tierra, perfiles de densidad y abundancia química de distintas especies que componen la atmósfera. Las especies químicas analizadas fueron: Ar, N₂, O₂ y He. Las variabilidades asociadas a estas especies en la atmósfera terrestre fueron obtenidas en el modelo empírico NRLMSISE 00. Este modelo interpola datos a partir de observaciones espectroscópicas llevadas a cabo por la red de satélites GOES (*Geostationary Satellite Server*), que miden abundancias de partículas neutras e ionizadas mediante técnicas de ocultación estelar (Montmessin et al., 2006). Los datos de diferentes especies químicas de la atmósfera terrestre son contrastados con datos de flujo solar característico F 10.7 cm para buscar posibles correlaciones asociadas a la dinámica periódica del ciclo solar.

La dinámica periódica del Sol ha sido objeto de estudio dentro del campo conocido como astrofísica solar. Actualmente se estima que el ciclo asociado a la variabilidad en su actividad dura alrededor de 11 años. Este comportamiento cíclico se manifiesta en patrones característicos de manchas solares que aparecen en la fotosfera solar, conocidos como patrones de mariposa (McIntosh et al., 2021). Si bien el número de manchas solares es un indicador de actividad solar, el flujo medido en radio F 10.7 cm es un indicador mas objetivo en cuanto a su detección y la resolución asociada a su medición Leamon et al. (2018).

Finalmente, cabe destacar que esta investigación sigue la misma línea documental (en el contexto del clima espacial y

caracterización de atmósferas planetarias) de trabajos como Kamsali et al. (2021), en donde se hacen análisis de variabilidad atmosférica a través de datos de la sonda MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*) en dos momentos característicos: un máximo y un mínimo solar. Y el trabajo de Leamon et al. (2018), en donde se estudia con alta significación estadística la correlación entre un evento solar característico conocido como terminador (el final de ciclo magnético solar), y las mayores oscilaciones de los índices oceánicos de la Tierra que determinan los efectos climáticos transitorios: fenómenos del niño y la niña.

2. Observaciones y reducción de datos

De todos los equipos de experimentos a bordo del orbitador de *Mars Express*, el SPICAM (*Spectroscopy for the Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars*) es el que lleva a cabo sondeos atmosféricos a través de técnicas de ocultación estelar. Los datos directos son imágenes espectroscópicas obtenidas en dos canales diferentes, uno UV y el otro IR. El canal IR analiza datos de absorción relacionados con las abundancias de moléculas de agua, cuya variabilidad es el centro del análisis de los resultados preliminares que fundamentan este documento.

El instrumento equipado en SPICAM en el canal infrarrojo está compuesto por una lente de entrada, un AOTF y dos detectores de un solo píxel, y tiene una resolución espectral de $0.4 - 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ y opera en un rango espectral de 1 a $1.7 \mu\text{m}$. Dado que el AOTF actúa como un filtro, el espectro IR se obtiene escaneando eléctricamente la frecuencia del AOTF (Fedorova et al., 2009). Este instrumento actualmente está en operación y transmite datos con una frecuencia de 1 Hz, que son almacenados en la fuente principal de datos planetarios de *Mars Express*: *Planetary Science Archive* de la ESA. El ruido instrumental de SPICAM provoca una incertidumbre sistemática de alrededor del 5 % de las cantidades recuperadas.

Con el propósito de estudiar la variabilidad de abundancias de agua en la atmósfera de Marte se recurre a datos numéricos inferidos y publicados de cuarto nivel de SPICAM de *Mars Express*. Estos corresponden a valores numéricos de variables físicas: alturas [km], temperaturas [K], y abundancias químicas en número de átomos por unidad de volumen [cm^{-3}] (Fedorova et al., 2021). Para el caso de la Tierra se dispone del modelo empírico NRLMSISE 00, que contiene datos numéricos de densidades de diversas especies químicas [cm^{-3}], alturas [km], temperaturas [K] y presiones [Pa] (Picone et al., 2002). Estos datos (Marte y Tierra) son analizados en ventanas de tiempo en los rangos 2004-2018 y 1961-2021, respectivamente. Dado el enfoque de la propuesta, entre mayor rango de tiempo se abarque para la caracterización de una señal, se tendrá mejor probabilidad al relacionar correctamente tal señal con la correspondiente de flujo solar.

Los datos de nivel 4 procesados de SPICAM de *Mars Express*, son sistematizados en tablas mediante comandos basados en lenguaje Python, para organizar la información disponible abiertamente en el Sistema de Datos Planetarios PDS de NASA y la ESA.¹

Por otro lado, las variabilidades que se encuentran en las curvas de densidad de especies químicas en las atmósferas planetarias podrían estar asociadas a actividad fotosférica del Sol, en este orden de ideas, se data la variabilidad de flujo solar, según detección de flujo en radio F 10.7 cm (UFS) normalizado a $UFS = 10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$. Estos datos son obtenidos del modelo empírico NRLMSISE 00, a expensas de que los datos allí incorporados corresponden a observaciones actualizadas de flujo solar característico (Emmert et al., 2021).

1. Ver página web: <https://www.cosmos.esa.int/web/psa/mars-express>

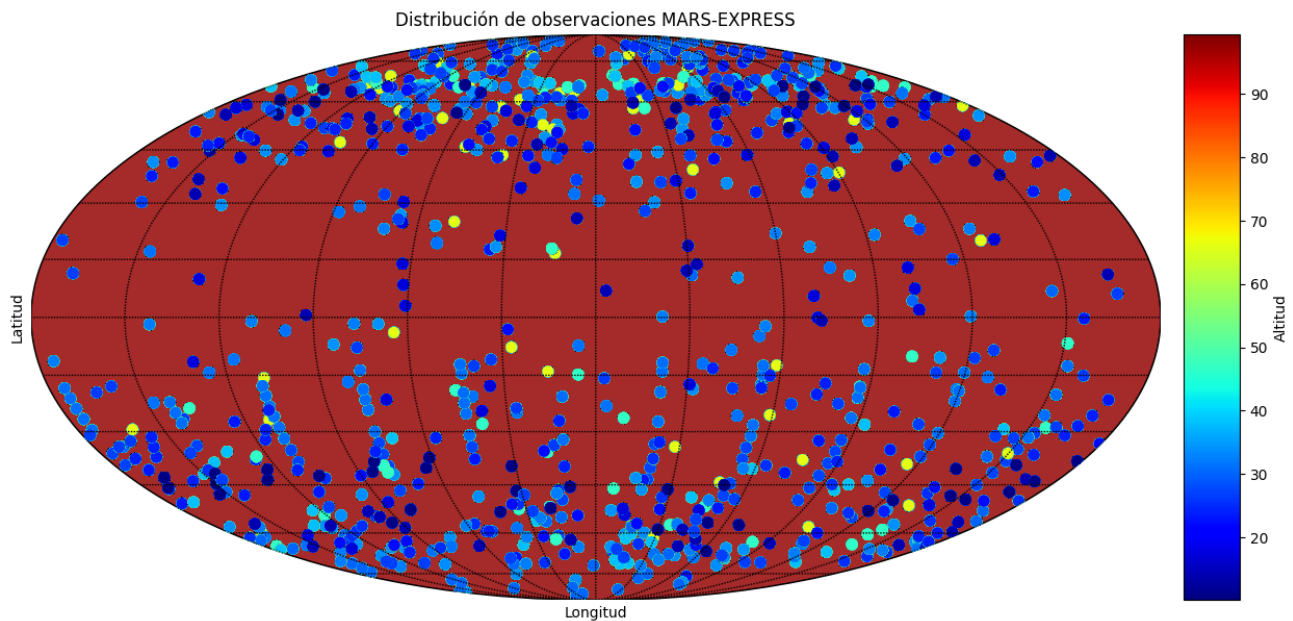


Figura 1. Distribución espacial de detecciones de SPICAM [IR] en Marte desde 2004 hasta 2018 para diferentes niveles de altitud.

Para el caso de Marte, la distribución espacial de los datos en las diferentes latitudes y longitudes del planeta depende de la frecuencia de toma de datos de SPICAM, recuérdese que esto corresponde a un muestreo de 1 Hz, de una sonda que orbita en una órbita cuasi polar con un periodo orbital de 7.5 horas. En este orden de ideas, las observaciones no están igualmente distribuidas espacialmente, tal y como se muestra en la **Figura 1**.

Las regiones delimitadas para los primeros resultados de la investigación en cuestión cubren el área superficial marciana entre las coordenadas geográficas $60^\circ < \text{Lat} < 80^\circ$ y $200^\circ < \text{Lon} < 280^\circ$.

Para el caso de la Tierra, la región cubierta corresponde a un perfil de columna basado en el modelo NRLMSISE 00, en donde los parámetros geográficos de entrada son coordenadas de un punto respecto del cual, el modelo hace la respectiva integración numérica para la determinación del perfil de columna correspondiente (Picone et al., 2002; Emmert et al., 2021), centrado en dicho punto para las dos alturas especificadas, a saber: 55 y 105 km. Así mismo, la distribución espacial de los datos reducidos es igual para todas las posiciones geográficas del planeta.

3. Resultados

3.1. Relación actividad solar y variabilidad atmosférica de Marte

En la **Figura 2** se identifica el margen de variación de dos curvas de densidad de vapor de H_2O en función de la altura en Marte, para dos fechas características a un máximo y un mínimo solar. Además, pueden visualizarse las líneas de error correspondientes a los datos, en donde se observa como el error aumenta conforme la detección se realiza a menor altura de la superficie.

A través de estos datos y el umbral de resolución del espectrómetro incorporado en SPICAM, se delimita el rango de alturas sobre el cual se establece el análisis en cuestión: entre 30 y 90 km. Para delimitar los tamaños de las franjas a estudiar dentro del rango de altura escogido, se tienen en cuenta dos criterios: el primero, la abundancia de datos disponibles a lo largo de los niveles de altura dentro del rango escogido previamente, y el segundo: capas de alturas con espesores por debajo de la altura

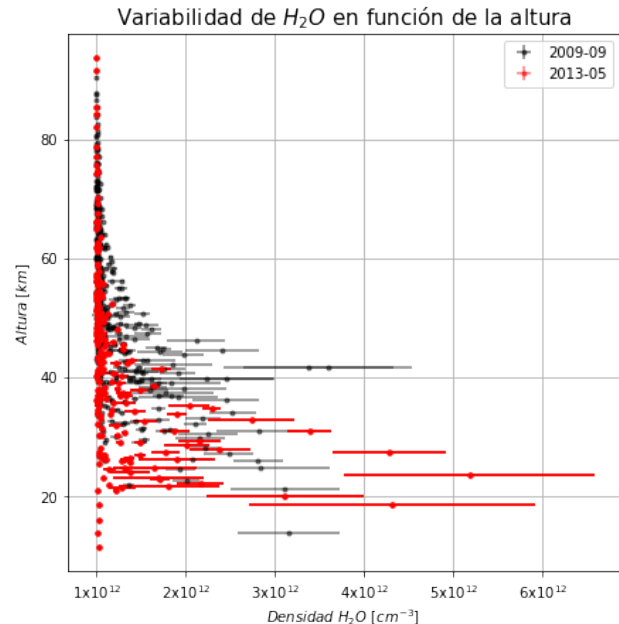


Figura 2. Variación de densidad de H_2O como función de la altura para dos fechas características: 05-2013: último máximo solar, y 2009-09: último mínimo solar registrados.

de escala media del planeta Marte (11.1 km) (Williams, 2023), garantizando que las variaciones de vapor de H_2O en la ventana de tiempo escogida, no se combinen con las variaciones debidas a los cambios de presión de la atmósfera a diferentes alturas de la superficie. En este orden de ideas, las franjas escogidas tienen un grosor de 5 km, y los datos que se esbozan en este estudio corresponden a las extensiones verticales de altitud: 50-55 y 70-75 km. Para estas dos franjas de altura, se tienen en promedio 52 detecciones distribuidas de forma desigualmente espaciada, esto dada la frecuencia muestreo del detector de SPICAM y el hecho de que el muestreo ocurre para diferentes latitudes, con diferentes perfiles de alturas dada la velocidad de movimiento orbital de la sonda *Mars Express*.

Luego se ilustran histogramas de la distribución de densidades de vapor de agua de la atmósfera marciana, en una ventana temporal entre 2004 y 2018 en las dos franjas de altura y posición geográfica seleccionadas como se muestra en los histogramas en las Figuras 3 y 4. En estos histogramas se delimitan los rangos de variabilidad de vapor de H_2O para la ventana temporal en cuestión, respecto de los cuales se lleva a cabo el análisis de relación entre periodo de flujo solar $F_{10.7}$ cm y periodo de variabilidad de concentración de H_2O en Marte.

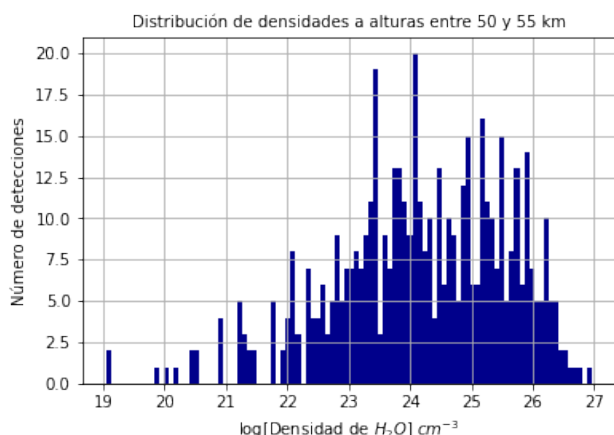


Figura 3. Histograma distribución de Densidades de H_2O rango de alturas entre 50 y 55 km.

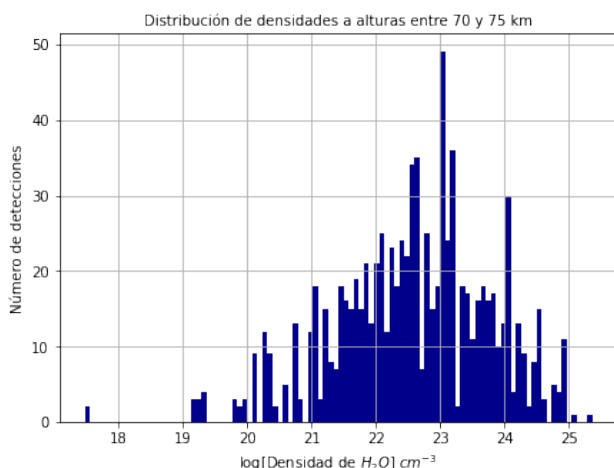


Figura 4. Histograma distribución de Densidades de H_2O rango de alturas entre 70 y 75 km.

Con la delimitación de las regiones a estudiar, se grafica la distribución de los datos de ambas señales (Flujo solar y densidad de H_2O) en la ventana temporal de interés, verificando si en tales distribuciones puede esbozarse alguna relación entre las dos señales (ver Figura 5).

Cuando se tienen calibradas las regiones espaciales sobre las cuales se hace el respectivo análisis de variabilidad y relación entre índice de flujo solar $F_{10.7}$ cm y densidad de vapor de H_2O , se ajustan los datos de las detecciones de SPICAM de tal modo que se obtienen valores promediados de densidad diaria (desigualmente espaciados), en contraste con valores de flujo solar típico $F_{10.7}$ cm, garantizando la misma resolución temporal de los dos conjuntos de datos a correlacionar.

El estudio de la relación entre estos dos fenómenos, se lleva a cabo a través de la caracterización periódica de ambas señales, esta caracterización se establece mediante la transformación de la ventana de tiempo al espacio de las frecuencias, de las dos señales a correlacionar, a través de la transformada rápida de Fourier (FFT), en lo que se conoce como el Periodograma de Lomb-Scargle. Este es un método que estima el espectro de frecuencias de una señal por medio de un ajuste de mínimos cuadrados de funciones armónicas. A diferencia del análisis de Fourier típico, no se requiere que las observaciones en la ventana de tiempo estén igualmente espaciadas (Lomb, 1976; Scargle, 1982).

Luego de hacer el respectivo análisis de Lomb-Scargle, se esbozan los resultados en el espacio de frecuencias para las señales de flujo solar normalizado logarítmicamente y la señal de variación de vapor de agua igualmente normalizada. Si bien puede observarse la semejanza de las dos señales en algunos picos característicos en el espectro de frecuencias, el análisis puede visualizarse con mayor detalle, en tanto se representan los datos en términos de los periodos asociados a las frecuencias características de las dos señales para los correspondientes rangos de altura escogidos (ver Figuras 6 y 7).

3.2. Correlaciones de especies químicas en la Tierra

El modelo empírico NRLMSISE 00 reproduce datos de variabilidad de diferentes especies químicas a distintas alturas de la atmósfera, así como flujo solar característico. En las Figuras 8 y 9 se esbozan las señales de variabilidad de dos especies químicas (O_2 y N) que presentan mayor volatilidad a la altura de 105 km, en contraste y correlación aparente con la señal de flujo solar en la ventana temporal 1961-2021. Ambas señales obtenidas del modelo en cuestión.

Los resultados del método de Periodograma de Lomb Scargle, para el caso de variación de densidades de algunas especies químicas a estudiar en la atmósfera de la Tierra, en correspondencia con la señal asociada a la variación de flujo solar, se esbozan en términos de los periodos en la Figura 10 para una altura de 55 km y en la Figura 11 para la altura de 105 km.

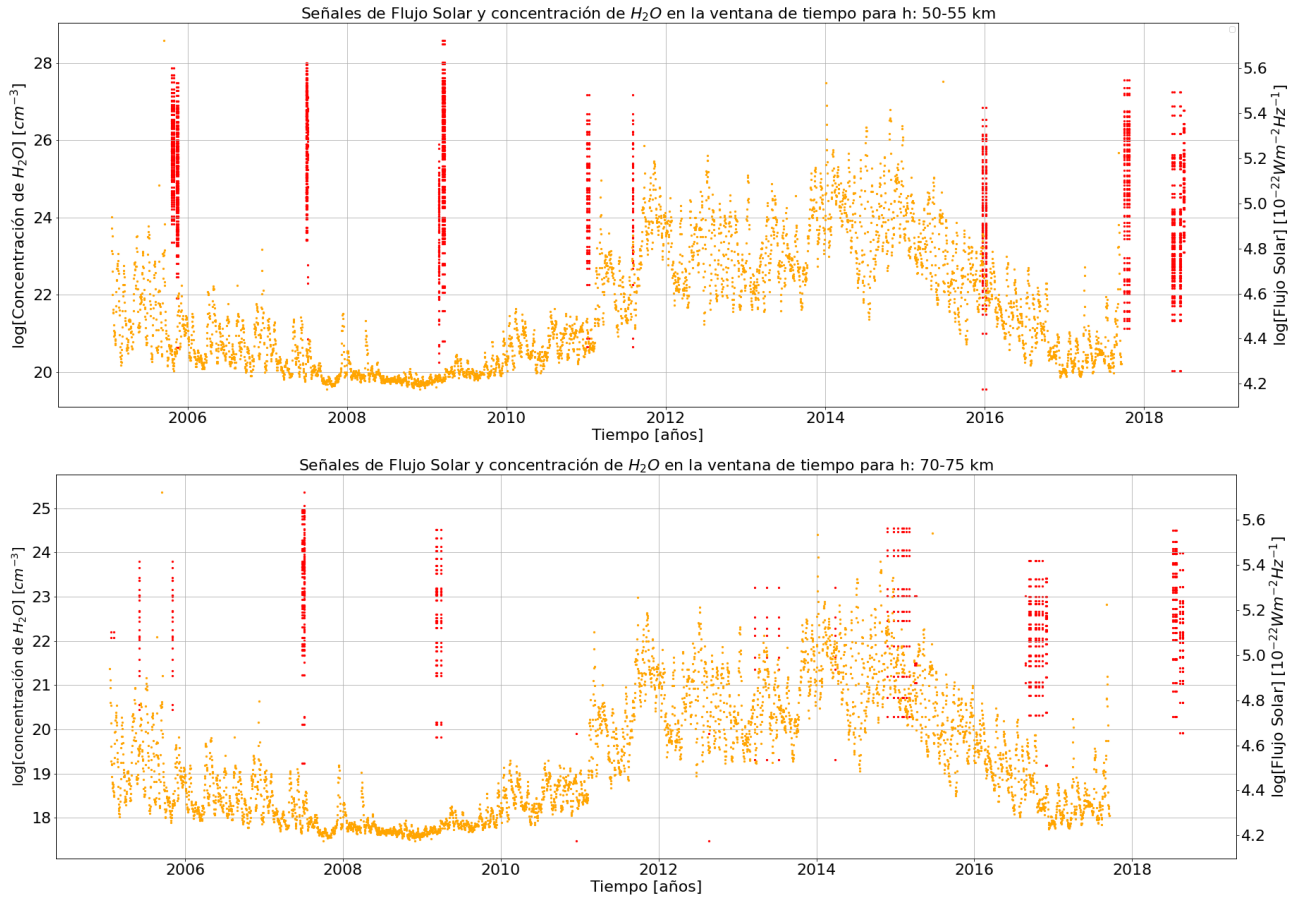


Figura 5. Distribución temporal de detecciones de H_2O SPICAM [IR] en Marte (rojo), en contraste con señal de variación de flujo solar (naranja) desde 2006 hasta 2018.

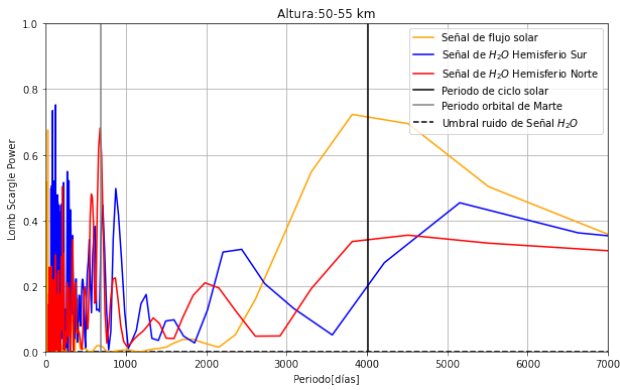


Figura 6. Periodograma de Lomb-Scargle de señales de Flujo Solar y densidad de H_2O a la altura 50-55 km, y con marcas temporales de ciclo Solar y periodo orbital de Marte.

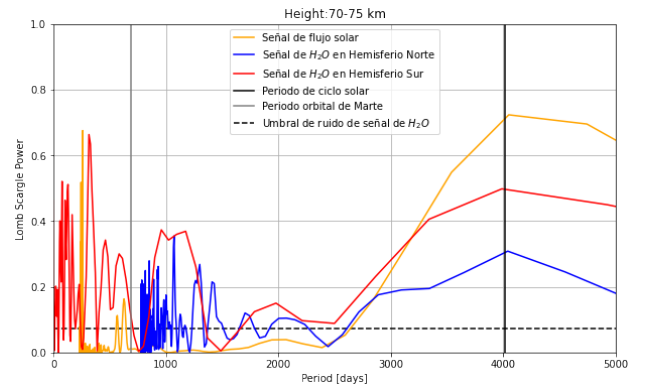


Figura 7. Periodograma de Lomb-Scargle de señales de Flujo Solar y densidad de H_2O a la altura 70-75 km, y con marcas temporales de ciclo Solar y periodo orbital de Marte.

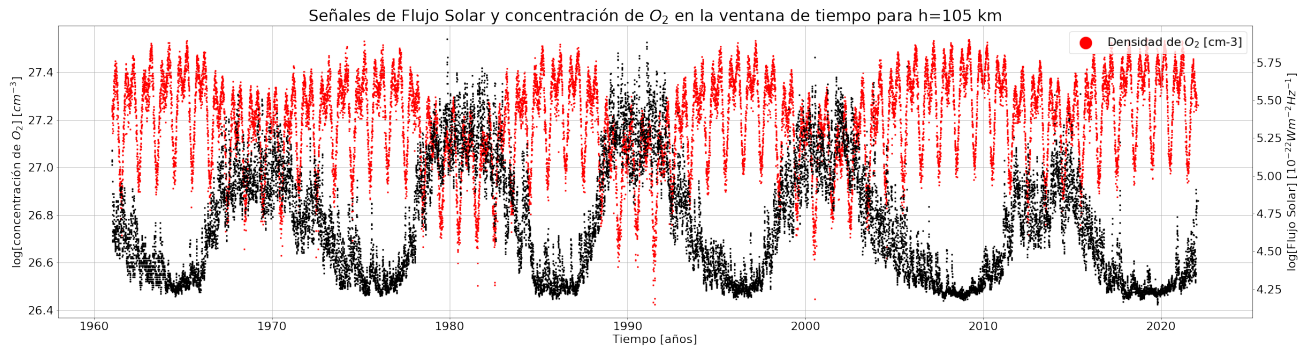


Figura 8. Distribución temporal de O_2 en la Tierra a una altura de 105 km, en contraste con señal de variación de flujo solar en la ventana temporal de 1961-2021.

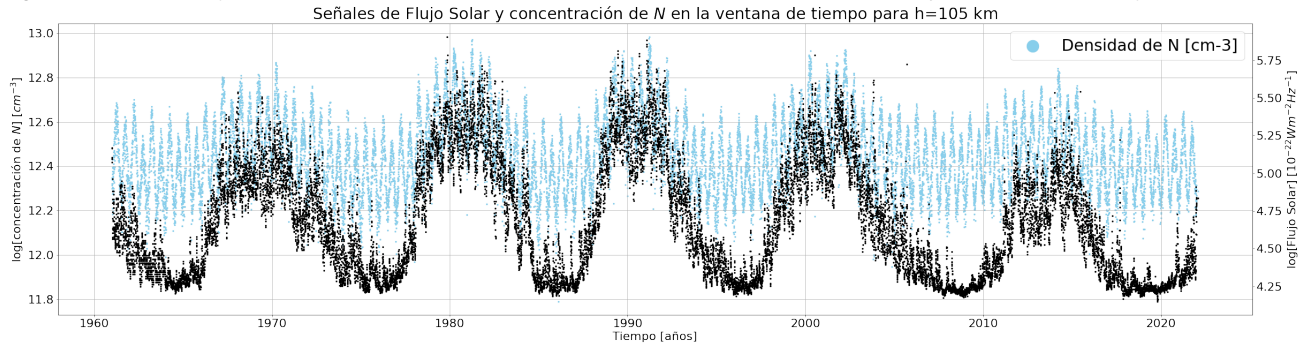


Figura 9. Distribución temporal de N_2 en la Tierra a una altura de 105 km, en contraste con señal de variación de flujo solar en la ventana temporal de 1961-2021.

Obsérvese la diferencia en los picos de las señales asociadas con el periodo del ciclo solar en la Tierra (ver **Figura 11**), para las alturas más altas, en comparación con las más bajas, en contraste con los picos de frecuencia y periodos de variabilidad de las señales químicas.

De acuerdo con el registro de datos del modelo atmosférico NRLMSISE 00, en la zona baja de la atmósfera terrestre a 55 km no se registran grados de abundancia de N (Nitrógeno), especie química que a la altura de 105 km, manifiesta un comportamiento altamente variable en la ventana de tiempo con una resolución temporal de 1 día. El pico de potencia (Potencia Lomb-Scargle) del N en un periodo cercano al del ciclo solar, supera en intensidad al pico correspondiente a la señal de variación de flujo solar (**Figura 11**).

3.3. Síntesis de resultados variabilidad atmosférica Tierra, Marte y ciclo solar

En general, para las especies químicas analizadas con el método de Lomb Scargle, a la altura de 105 km (para la Tierra) y el rango de alturas 70-75 km (para Marte), parecen existir correlaciones marcadas con la curva de variabilidad de flujo solar, especialmente en valores periódicos de tiempo cercanos a los 11 años del ciclo solar, a expensas de las siguientes sutilezas:

En las señales de variabilidad en la concentración de agua en la atmósfera de Marte, manifiestas en el periodograma de Lomb-Scargle a un rango de altura de 50-55 km de la superficie, se denota semejanza de picos entre la señal de flujo solar y la señal de variabilidad de vapor de agua en el hemisferio Norte del planeta. En tanto, la señal de esta misma especie química, en hemisferio sur, parece estar levemente desfasada. Este efecto se da también para los datos de vapor de H_2O en el rango de alturas 70-75 km (**Figura 7**).

Los desfases podrían estar relacionados con el hecho de que hay dos ciclos de Marte involucrados en un periodo de variabilidad de actividad solar. El primero, la variación en la concentración de H_2O , asociada al periodo de actividad solar (hipótesis del estudio), y el segundo, la variación asociada al periodo orbital estacional. La combinación de estos dos ciclos, y el hecho de que

no coincidan el uno con el otro, podría ser la causa de los desfases en los periodogramas respecto del periodo de ciclo solar. El desfase observado en cada uno de los dos hemisferios, también podría estar asociado a la variación estacional que determina los momentos de la órbita en que los hemisferios experimentan mayor o menor exposición a la radiación solar según grado de inclinación del eje de rotación del planeta, que para el caso de Marte es similar al de la Tierra (Williams, 2023).

La concordancia entre los dos picos de variabilidad de las dos señales emparejadas (flujo solar y especie química) en el valor del periodo que corresponde al ciclo solar parece sugerir la existencia de relación entre estas señales para alturas dentro de la termosfera de ambos planetas. Sin embargo, en los resultados preliminares que se esbozan en este estudio, determinar en rigor la existencia de una relación precisa entre ambas señales para distintas especies químicas, es un trabajo que requiere contrastación de datos con otros orbitadores, así como llevar a cabo un análisis estadístico de correlación más profundo sobre los datos, que no corresponde a los objetivos de la investigación preliminar que se presenta en esta publicación.

4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se encuentra una posible relación entre periodo de variación de actividad solar, y los cambios en densidad de las especies químicas escogidas para la Tierra a una altura de 105 km de la superficie. Igualmente, se encuentra con la variación de actividad solar una variación en la concentración de vapor de H_2O en la termosfera baja de Marte a la luz del método aplicado en esta primera fase de la investigación. El panorama de investigación se puede ampliar en futuros trabajos con el estudio a otras especies químicas en Marte a partir de datos de otras naves de sondeo atmosférico, como Mars Reconnaissance Orbiter y MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution).

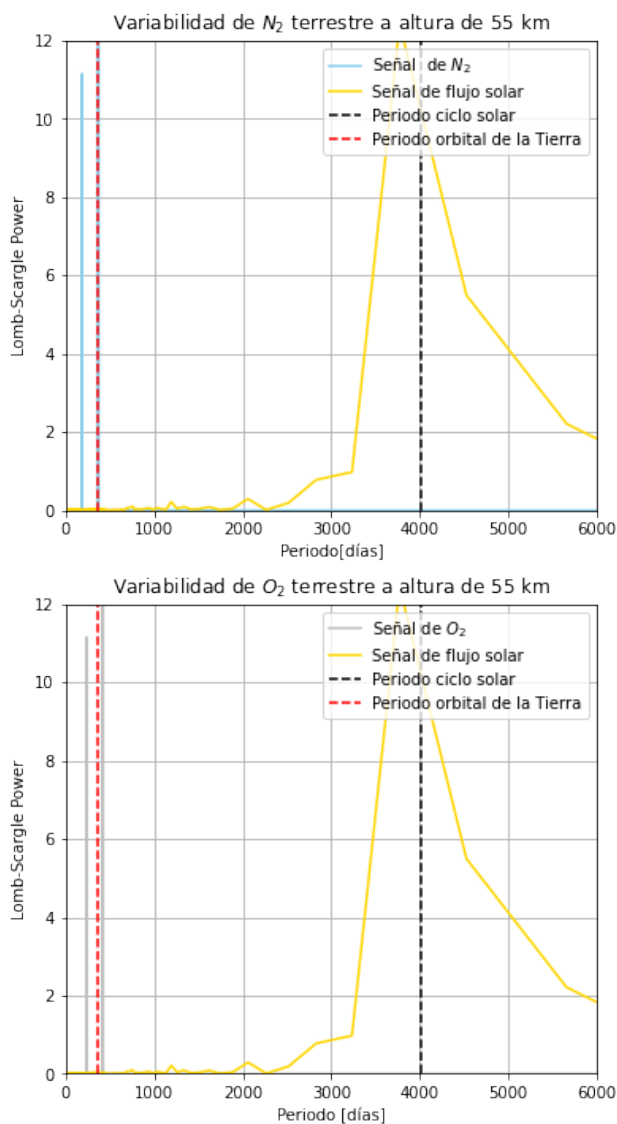


Figura 10. Periodograma de Lomb-Scargle de señales de Flujo Solar y densidad de distintas especies químicas en la Tierra, a $h=55$ km. Observe las marcas temporales de ciclo Solar y periodo orbital terrestre.

Agradecimientos

JNMC agradece especialmente al Group of Solar Astrophysics (GoSA) y al Observatorio Astronómico Nacional por ser el espacio en donde las diversas retroalimentaciones recibidas dieron buen rumbo a la propuesta. También se agradece a James R. Murphy por los consejos en cuanto al procesamiento de los datos de orbitadores antiguos de Marte (*Mars Express* y *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO)). Finalmente, un agradecimiento al Colectivo Orbitamautas por ser el espacio informal en donde se pudo poner a prueba la capacidad comunicativa de este trabajo.

Referencias

- Chicarro, A. (1999). Mars express: Mission scenario and objectives. *Laboratory astrophysics and space research*, pages 523–527.
- Economou, T. (2008). Mars atmosphere argon density measurement on mer mission. *LPI Contributions*, 1447.
- Emmert, J. T., Drob, D. P., Picone, J. M., Siskind, D. E., Jones Jr., M.,

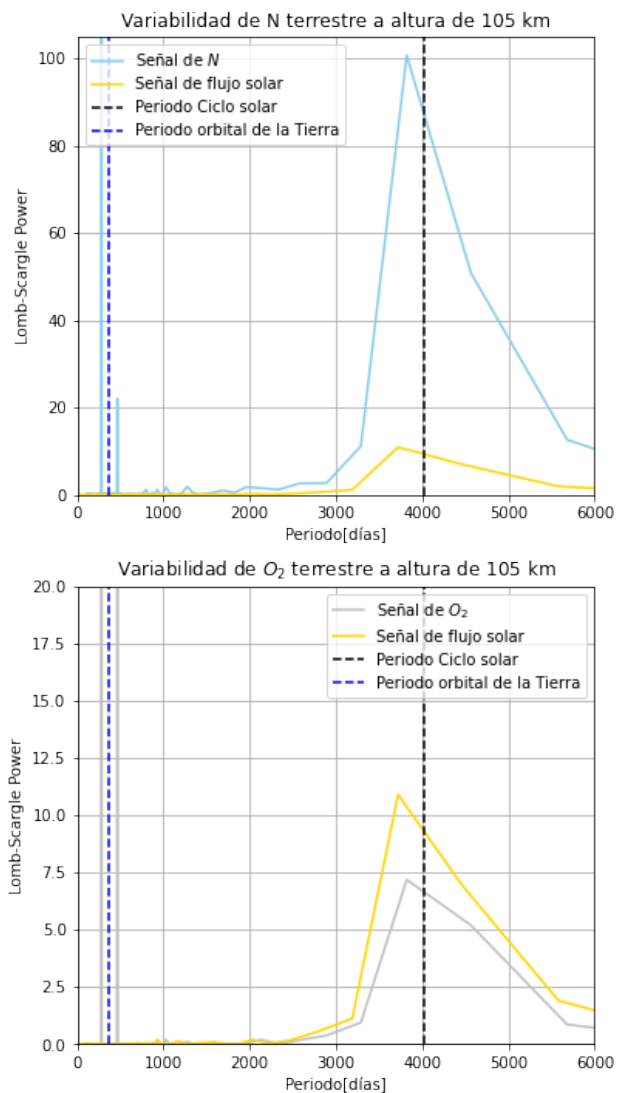


Figura 11. Periodograma de Lomb-Scargle de señales de Flujo Solar y densidad de distintas especies químicas en la Tierra, a $h=105$ km. Observe las marcas temporales de ciclo Solar y periodo orbital terrestre.

- Mlynczak, M. G., Bernath, P. F., Chu, X., Doornbos, E., Funke, B., Goncharenko, L. P., Hervig, M. E., Schwartz, M. J., Sheese, P. E., Vargas, F., Williams, B. P., and Yuan, T. (2021). Nrlmsis 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth and Space Science*, 8(3):e2020EA001321. e2020EA001321 2020EA001321.
- Fedorova, A., Korablev, O., Bertaux, J.-L., Rodin, A., Montmessin, F., Belyaev, D., and Reberac, A. (2009). Solar infrared occultation observations by spicam experiment on mars-express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of h_2o , co_2 and aerosol. *Icarus*, 200(1):96–117.
- Fedorova, A., Montmessin, F., Korablev, O., Lefèvre, F., Trokhimovskiy, A., and Bertaux, J.-L. (2021). Multi-annual monitoring of the water vapor vertical distribution on mars by spicam on mars express. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(1):e2020JE006616. e2020JE006616 2020JE006616.
- Franz, H. B., Trainer, M. G., Malespin, C. A., Mahaffy, P. R., Atreya, S. K., Becker, R. H., Benna, M., Conrad, P. C., Eigenbrode, J. L., Freissinet, C., Manning, H. L., Prats, B. D., Raaen, E., and Wong, M. H. (2017). Initial sam calibration gas experiments on mars: Quadrupole mass spectrometer results and implications. *Planetary and Space Science*, 138:44–54.
- Haberle, R. (2015). Solar system/sun, atmospheres, evolution of

- atmospheres | planetary atmospheres: Mars. pages 168–177.
- Haider, S. A., Mahajan, K. K., and Kallio, E. (2011). Mars ionosphere: A review of experimental results and modeling studies. *Reviews of Geophysics*, 49(4).
- Kamsali, N., Basuvaraj, P., Chakravarty, S., and Kumar, K. (2021). Solar wind-driven day-to-day effects on the martian thermosphere/exosphere composition.
- Leamon, R. J., McIntosh, S. W., and Marsh, D. R. (2018). Termination of solar cycles and correlated tropospheric variability.
- Lomb, N. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39:16.
- McIntosh, S. W., Leamon, R. J., Egeland, R., Dikpati, M., Altrock, R. C., Banerjee, D., Chatterjee, S., Srivastava, A. K., and Velli, M. (2021). Deciphering solar magnetic activity: 140 years of the 'extended solar cycle'—mapping the hale cycle. *Solar Physics*, 296(12):189.
- Montmessin, F., Quémerais, E., Bertaux, J. L., Korablev, O., Rannou, P., and Lebonnois, S. (2006). Stellar occultations at uv wavelengths by the spicam instrument: Retrieval and analysis of martian haze profiles. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E9).
- Petrosyan, A., Galperin, B., Larsen, S. E., Lewis, S. R., Määttänen, A., Read, P. L., Renno, N., Rogberg, L. P. H. T., Savijärvi, H., Siili, T., Spiga, A., Toigo, A., and Vázquez, L. (2011). The martian atmospheric boundary layer. *Reviews of Geophysics*, 49(3).
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C. (2002). Nrlmsise-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12):SIA 15–1–SIA 15–16.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. ii-statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 263, Dec. 15, 1982*, p. 835–853., 263:835–853.
- Tian, R., Jiang, C., Yang, G., Yin, W., Zhang, Y., and Zhao, Z. (2022). Solar cycle and seasonal variability of martian ionospheric irregularities from mars atmosphere and volatile evolution observations. *The Astrophysical Journal*, 931(1):18.
- Williams, D. R. (2023). Mars fact sheet. *NASA Goddard Space Flight Center*.
- Voiceshyn, P. M. (1974). Global seasonal atmospheric fluctuations on mars. *Icarus*, 22(3):325–344.