

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

**TRABAJO FIN DE
MÁSTER**

***PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN LA
SUPERFICIE DE MARTE CON
DATOS DE LA MISIÓN ESPACIAL
INSIGHT***

Estudiante	<i>Díez, Mouriño, Keila</i>
Director/Directora	<i>Hueso, Alonso, Ricardo</i>
Departamento	Física Aplicada I
Curso académico	2019-2020

Bilbao, 28, 08, 2020

Resumen Trilingüe

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad el estudio de la presión atmosférica en la superficie de Marte en la localización ecuatorial de la misión Insight. Para este trabajo se han analizado datos públicos del instrumento TWINS en Insight mediante programas escritos en el lenguaje de programación IDL. En particular se han caracterizado las caídas bruscas de presión producidas por remolinos de polvo (dust devils), provocados por vórtices convectivos, y se ha hecho un estudio de las variaciones diarias de presión utilizando series de Fourier y descomponiendo la señal diaria de presión en variaciones armónicas. Los primeros modos armónicos de la serie de Fourier corresponden físicamente a los efectos de las mareas solares térmicas.

Palabras clave:

Marte: Atmósfera, dust devil, marea solar

Laburpena

Lan honen helburua, Marte azaleran, insight misioaren kokapen ekuatorialean dagoen presio atmosferikoa aztertzea da. Lan honetarako, aztertu dira Insightko TWINS tresnaren datu publikoak, IDL programazio hizkuntzan idazitako programen bidez. Zehazki, presio erorketa bortitzak ezaugarritu dira, hauts zurrunbiloen ondorioz, eta hauek, berriz, bortize konbektiboen ondorioz, eta aztertu dira presio eguneroko aldakuntzak Fournier serieak erabiliz eta presio eguneroko seinalea aldakuntza armonikoetan deskonposatzen. Serie Fourierreko lehenengo modu armonikoak, fisikoki eguzki marea termikoen efektuei dagozkie.

Hitz gakoak:

Marte: atmksfera, dust devil, marea termikoa

Abstract

The aim of this proyect is to study variation of pressure in the surface of Mars, at the ecuador of the planet, where Insight is. Pubic data of the instrument Twins from Insight will be used, with the help of programs written in IDL language. Pressure drops will be searched and studied. They are denominated dust devils and are produced by convective vortex. Futhermore a study of diurnal variety of pressure will be realised, using the analysis of Fourier and descomposing the signal in harmonical variations. This first Fouerier's serial modes are physically related with the effects of solar thermal tides.

Keywords:

Dust devil, convective vortex, sol, thermal tide

Índice

1.	Introducción	2
1.1.	Marte: El planeta rojo	2
1.2.	La atmósfera de Marte	2
1.3.	La misión Insight	4
1.4.	Medidas de presión de Insight	5
1.5.	Contexto meteorológico	6
1.6.	Objetivos de este trabajo	9
2.	Datos de Insight	10
2.1.	Fuentes de datos utilizadas	10
2.2.	Características de los datos de presión	10
2.3.	Estrategias de análisis	12
3.	Análisis de las medidas de Presión: Búsqueda de Dust Devils	14
3.1.	Vórtices convectivos y dust devils	14
3.2.	Búsqueda de dust devils	14
3.3.	Distribución global	20
4.	Análisis de las variaciones diarias de presión	23
4.1.	Las mareas solares en Marte	23
4.2.	Análisis de Fourier de los datos de presión	25
5.	Resumen y Conclusiones	27
6.	Referencias	28

Apéndices:

A1. Lista de acrónimos

Índice de Figuras

Ilustración 1. Instrumentos de la misión Insight.	2
Ilustración 2. Llanura de Elysium Plania, lugar de aterrizaje de la misión Insight.	7
Ilustración 3. Gráfico de la media zonal y diurna mediante mapas de mallado.	8
Ilustración 4. Datos de presión en Pa para el sol 22.	11
Ilustración 5. Datos de presión en Pa para el sol 4.	11
Ilustración 6. Resumen del funcionamiento de los programas utilizados.	13
Ilustración 7. Dust devil observado en el sol 14 de la misión Insight.	15
Ilustración 8. Recopilación de las tres caídas de presión más bruscas.	17
Ilustración 9. Ejemplo de caídas de presión largas.	18
Ilustración 10. Ejemplos de caídas bruscas de presión ocurridas en horas alejadas del mediodía.	19
Ilustración 11. Gráfico de burbujas para la distribución global de los dust devils.	20
Ilustración 12. Número de evento (dust devils) detectados por sol.	22
Ilustración 13. Gráficas de presión y temperatura en Marte.	24
Ilustración 14. Presiones promedio en la superficie de Marte y amplitud de los modos armónicos.	25

1. Introducción

1.1. Marte: El planeta rojo

Marte es el cuarto planeta más cercano al Sol y el que posee una superficie con un mayor parecido con la de la Tierra. Su diámetro es de unos 6,779 km y la órbita de Marte es una elipse con semieje mayor de 227 millones de kilómetros (1.52 Unidades Astronómicas) y una excentricidad de 0.093. Su eje de rotación está inclinado 25.2º con respecto al plano orbital. El ciclo de rotación diario es de 24 horas, 37 minutos y 35.244 segundos y el periodo orbital es de 687 días. Al periodo de rotación diario se le denomina sol.

En la actualidad Marte es un planeta sin actividad geológica o campo magnético global. Sin embargo, su superficie es rica en antiguos volcanes de gran tamaño, como el Monte Olimpo, el volcán más grande del Sistema Solar, o los volcanes de Tharsis. Otras estructuras geológicas como el Valle Marineris muestran un pasado con una importante actividad geológica desaparecida hace mucho tiempo. El color rojo de la superficie es debido a la presencia de óxidos de hierro y posee dos pequeños satélites, Fobos y Deimos, que podrían ser asteroides capturados.

La superficie de Marte muestra evidencias de un pasado geológico con agua líquida circulando sobre su superficie. Estas evidencias son cauces de ríos secos y amplios depósitos minerales que requieren de agua líquida para su formación, como los asociados a las arcillas comunes del hemisferio norte. En la actualidad el agua se encuentra principalmente congelada en grandes casquetes polares y en depósitos helados bajo la superficie. Los casquetes polares también sufren una evolución estacional debido al ciclo de condensación y sublimación del CO₂ de la atmósfera. El hecho de que en Marte existiera un pasado geológico rico en agua indica la posibilidad de que en su superficie se desarrollara la vida. La búsqueda de vida en Marte es una pregunta fundamental en la exploración del Sistema Solar y ha motivado toda una flota de misiones espaciales que han viajado al planeta Marte para caracterizarlo en la actualidad, estudiar su pasado geológico, estudiar la historia del agua en Marte y caracterizar los lugares de mayor interés astrobiológico.

1.2. La atmósfera de Marte

La atmósfera de Marte está constituida principalmente por CO₂ (95%) con un 2,6% de N₂ y un 1,6% de argón. Esta atmósfera es muy tenue, con una presión media en la superficie de unos 600 Pa (6 mbar), unas 90 veces menor que la terrestre (1013 mbar). En la atmósfera pueden encontrarse otros compuestos minoritarios como H₂O, O₂ y CO [1]. Las evidencias de un pasado geológico rico en agua líquida indican que la atmósfera de Marte se ha ido perdiendo paulatinamente. Se considera que esta pérdida atmosférica es una consecuencia de la combinación entre menor masa y gravedad de Marte y la inexistencia de un campo magnético global que pueda proteger las capas altas de la atmósfera de su erosión por el viento solar.

Al estar Marte más lejos del Sol que la Tierra y tener una atmósfera poco densa, las temperaturas de la superficie son mucho más frías que las terrestres, y las diferencias de temperatura diurnas y estacionales son mucho más pronunciadas. Por ejemplo, la máxima temperatura diurna en el ecuador puede alcanzar los 20°C descendiendo durante la noche hasta los -80°C y la temperatura nocturna en las regiones polares en invierno puede alcanzar los -160°C [2].

Las trazas de agua que hay en la atmósfera condensan formando nubes que siguen un ciclo estacional y en muchas ocasiones pueden tener un origen topográfico. En condiciones especialmente frías pueden producirse también nubes de CO₂ congelado. Ambos tipos de nubes contribuyen a modificar como la radiación del Sol y la emisión térmica de la superficie transportan calor en la atmósfera pero son mucho más importantes los efectos radiactivos asociados al polvo de la atmósfera. Marte tiene una gran cantidad de aerosoles procedentes de la superficie cuya abundancia en la atmósfera sigue un comportamiento estacional. El polvo atmosférico tiene una gran importancia para determinar las temperaturas del planeta rojo ya que es el principal elemento de la atmósfera que puede absorber, reflejar o difundir la radiación atmosférica.

Existen numerosos fenómenos físicos capaces de levantar polvo de la superficie transportándolo hasta capas elevadas (varias decenas de kilómetros) de la atmósfera de Marte. Los más conocidos son las tormentas de polvo marcianas que ocurren en un amplio rango de escalas desde la local a la planetaria. Las tormentas de polvo en Marte pueden llegar a crecer hasta cubrir por completo la superficie del planeta creando un gran impacto en las temperaturas y el comportamiento de la atmósfera. Otros eventos capaces de levantar polvo son remolinos convectivos denominados en inglés "Dust Devils". En general la abundancia de polvo en Marte sigue un ciclo estacional semejante al ciclo estacional de tormentas de polvo.

Debido a las bajas temperaturas de las regiones polares y a las altas variaciones de temperatura durante el ciclo diurno, la presión atmosférica en la superficie experimenta fuertes variaciones estacionales y diurnas. En los inviernos de ambos hemisferios las temperaturas frías polares dan lugar a la condensación de grandes cantidades de CO₂ formando hielos polares que subliman con la llegada de la primavera y que dan lugar a un ciclo anual de presión atmosférica. Sin embargo, la elevada excentricidad de la órbita de Marte hace que las estaciones sean más largas en el hemisferio Sur, resultando en efectos más extremos. Cuando se produce el invierno en el hemisferio Sur la presión atmosférica alcanza su valor mínimo sobre la superficie del planeta. El ciclo diurno de presión es producido por las fuertes variaciones de temperatura posibles en un planeta como Marte con su tenue atmósfera. Con la llegada del calor durante el día el aire asciende sobre la topografía del planeta desplazándose hacia las regiones más elevadas y descende con la llegada de la noche y las temperaturas más frías. La asimetría del terreno entre las tierras altas del hemisferio Sur y las tierras bajas del hemisferio Norte, así como la presencia de grandes estructuras geológicas como los volcanes de Tharsis produce un ciclo diario de viento y presión. Ambos ciclos de presión (estacional y diario) pueden hacer variar la presión atmosférica

en aproximadamente un 10% del valor medio. Los efectos diarios determinados por el ciclo diurno de radiación se consideran producidos por los efectos térmicos de la marea solar.

Las medidas de viento obtenidas por las misiones Viking determinaron que la velocidad media del viento en la superficie de Marte es en general muy pequeña: 1-4 m/s (4-15 km/h). Sin embargo, en condiciones menos habituales, como cuando se desarrollan tormentas de polvo, los vientos pueden llegar a alcanzar velocidades mayores de 30-40 m/s (110-150 km/h). [2]

El estudio actual de la atmósfera de Marte es fundamental para entender el pasado de Marte y su evolución. También es fundamental para determinar las condiciones de aterrizaje de las misiones espaciales robóticas actuales y de las futuras misiones tripuladas.

1.3. La misión Insight

La misión Insight es una misión de NASA que consiste en una plataforma robótica en la superficie del planeta dedicada al estudio de la geología de Marte y su atmósfera. El objetivo principal de la misión es caracterizar la actividad geológica actual de Marte. Para ello se pretende detectar y caracterizar ondas sísmicas internas producidas por la actividad geológica interna del planeta capaces de sondear el tamaño del núcleo interior y su estructura sólida o fluida, ondas sísmicas externas producidas por la caída de pequeños meteoritos y transportadas por la corteza marciana, y determinar el flujo interno de calor [3]. Con ello se aspira a comprender mejor los aspectos de la formación del planeta y su evolución geológica hasta la actualidad. Conociendo el estado geológico actual de Marte y su evolución se espera comprender también mejor cómo evolucionan los planetas de tipo terrestre de diferente tamaño.

Insight dispone de una amplia gama de instrumentos científicos [4]. Los más importantes son los siguientes: El instrumento Seismic Experiment for Interior Structure (SEIS), un sismómetro de muy alta precisión. El instrumento Heat Flow and Physics Properties Probe (HFP3), una sonda térmica capaz de medir el flujo térmico del interior del planeta. El instrumento Rotation and Interior Structure Experiment (RISE), un conjunto de dos antenas de radio en banda X capaces de emitir pulsos hasta la Tierra. El análisis Doppler de estos pulsos permiten realizar medidas de posición y velocidad de muy alta precisión que permitirán determinar el estado de rotación de Marte y los efectos sobre este que podría tener un núcleo líquido o sólido.

Además de estos instrumentos, Insight cuenta con el instrumento TWINS (*Temperatures and Winds for Insight*). Este instrumento constituye la participación española en la misión y ha sido desarrollado principalmente en el Centro de Astrobiología de Madrid. Se trata de la segunda estación meteorológica funcionando actualmente en Marte tras su predecesora REMS, situada en el rover Curiosity de la misión Mars Science Laboratory (MSL) y es a su vez predecesora de la estación MEDA

(*Mars Environment Dynamics Analyzer*) que viaja a Marte como parte de la instrumentación de la misión Mars 2020 y su rover Perseverance. TWINS, está compuesto por dos booms colocados en partes opuestas de la sonda. TWINS mide la temperatura del aire y la velocidad del viento y adicionalmente existe un sensor de presión que mide con frecuencia elevada la presión atmosférica. Inicialmente TWINS constituía un instrumento de ingeniería necesario para caracterizar la contaminación atmosférica de las vibraciones detectadas por el sismógrafo, pero naturalmente puede realizar una ciencia atmosférica propia.

Insight aterrizó en Marte el 26 de noviembre de 2018 y continúa funcionando desde entonces. Los primeros análisis científicos del instrumento TWINS han sido publicados recientemente. [5]

1.4. Medidas de presión de Insight

La misión Insight es la primera misión en Marte que dispone de la capacidad de obtener medidas continuas de la meteorología marciana desde su superficie. También es la primera misión en incorporar un sensor de presión de alta frecuencia y con alta precisión. El sensor de presión a bordo toma medidas a 20 Hz, con un nivel de ruido muy inferior al de otros instrumentos similares enviados anteriormente a Marte. El sensor se encuentra en el interior del cuerpo de la plataforma Insight y se comunica con la atmósfera por un tubo de entrada que minimiza los efectos del viento en la presión. Sin embargo, a frecuencias superiores a 2 Hz a veces se correlaciona la presión con la velocidad del viento.

Los dos brazos de TWINS se encuentran sobre dos mástiles a una altura de 1.2m aproximadamente por encima de la superficie y encima también de los paneles solares. En cada brazo hay sensores específicos del viento y temperatura del aire. Estos sensores operan a una frecuencia de 1 Hz y producen medidas con una precisión de aproximadamente 1 m s^{-1} para la velocidad del viento, $22,5^\circ$ para su dirección y 5 K para la temperatura. Las medidas originales del sensor de vientos han de corregirse de efectos asociados a la perturbación que impone TWINS sobre el viento local. Para ello se utilizan los resultados de simulaciones numéricas y se considera que las medidas dejan de ser fiables en condiciones de mayor turbulencia cuantificada por el equipo para números de Reynolds mayores de 50. Estas medidas de viento se filtran además con filtros numéricos de paso bajo que suavizan la señal electrónica original [5].

En la siguiente imagen se mostrarán los instrumentos de la misión Insight.

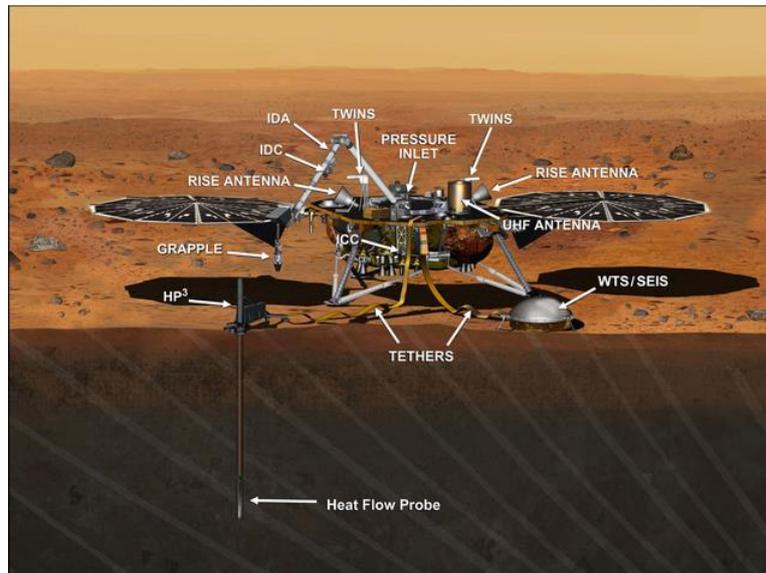


Ilustración 1. Instrumentos de la misión Insight.

Por motivos asociados a las operaciones de los primeros días en Marte desplegando los instrumentos SEIS y HFP3 existen soles que carecen de datos medidos por los sensores meteorológicos. Por ejemplo, no existen datos de presión desde el sol 6 al 9. Por otro lado, hay soles incompletos, como por ejemplo el 5. Los huecos en los datos en estos y otros soles afectan a una pequeña parte de los análisis realizados en este trabajo y su importancia se discutirá en el apartado 2.2. En este trabajo de fin de máster tan solo se ha trabajado con los datos de presión.

1.5. Contexto meteorológico

Insight aterrizó en Marte el 27 de noviembre de 2018 a 4.5° N 135.6° E, en Elysium Planitia. Elysium Planitia es una amplia llanura que se extiende por ambos lados del ecuador. Esta cerca de Elysium, la segunda región volcánica más grande del planeta. El aterrizaje se produjo con una longitud solar $L_s=296.2^\circ$, poco después del solsticio de invierno del hemisferio Norte acercándose al final de la estación de tormentas de polvo y meses después de que finalizara la Gran Tormenta de Polvo de Marte del año 2018 [6, 7].

Insight aterrizó al Norte del cráter Gale (donde se encuentra Curiosity). La figura inferior indica el lugar exacto del aterrizaje de la misión está marcado en la imagen.

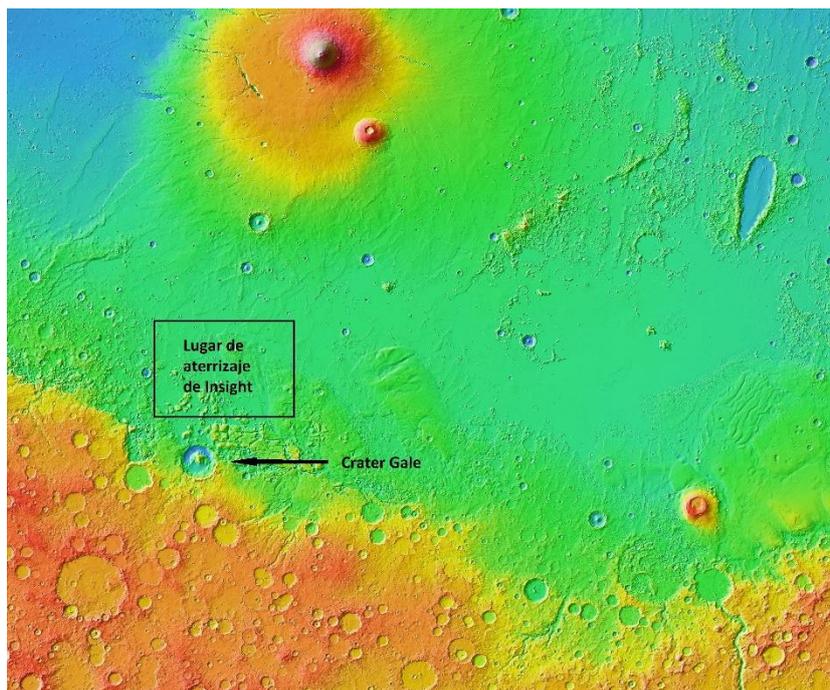


Ilustración 2. Llanura de Elysium Plania, lugar de aterrizaje de la misión Insight.

Elysium Planitia está situada en la dicotomía marciana entre los terrenos altos del Sur y las tierras bajas del norte. Esto combinado con la estructura llana de la región determina un patrón de vientos causados principalmente por la dicotomía marciana.

El contexto meteorológico global de las medidas locales de Insight viene dado por observaciones mediante plataformas espaciales. Montabone et al. (2020) [8] han presentado el contexto global de abundancia de polvo en el planeta durante los primeros meses de la misión Insight. La misión Insight coincidió con una tormenta de polvo, que comenzó al otro lado de Marte y que creció hasta tamaños regionales expandiéndose durante los soles 40 a 50 de la misión. Dichos soles corresponden a un valor L_s desde 319.73° hasta 325.51° . Esto produjo que las variaciones de presión diurnas y semi diurnas se incrementasen.

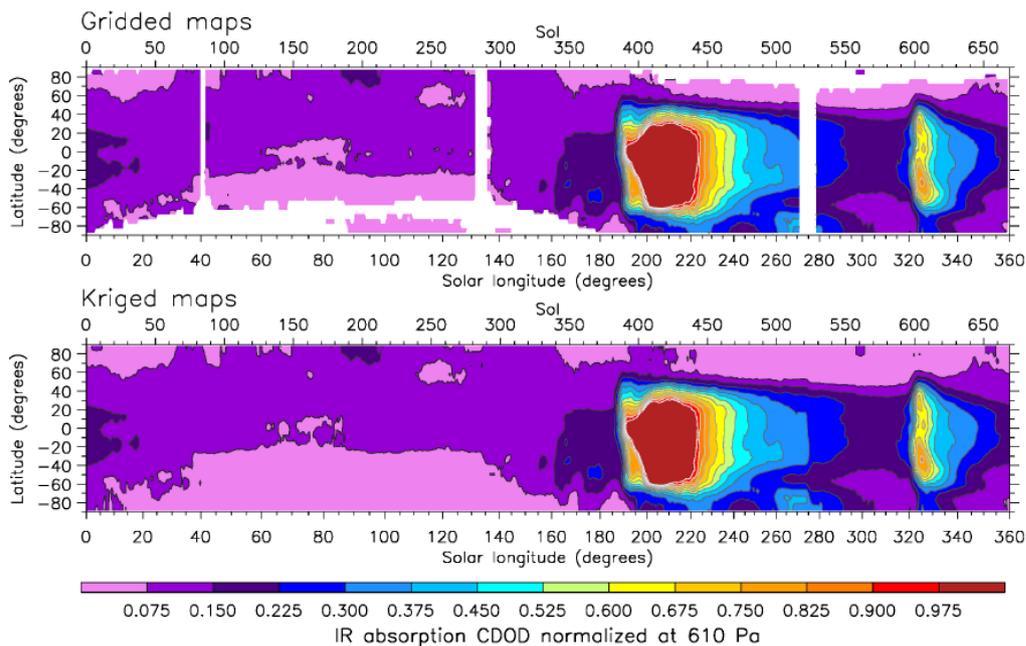


Ilustración 3. Gráfico de la media zonal y diurna mediante mapas de mallado de la tormenta del año marcial 24, coincidiendo con Insight.

Esta imagen corresponde a dos gráficos de la media zonal y diurna mediante mapas de mallado de la tormenta del año marcial 24, coincidiendo con Insight, sobre una absorción de profundidad óptica de columna de polvo de $9,3 \mu\text{m}$ a nivel de referencia de presión de 610 Pa para el panel superior. Para el panel inferior se han usado técnicas de krigeaje. El color blanco corresponde de la imagen superior a carencias de datos de mallado en dichas latitudes y momentos. La figura inferior no tiene puntos de krigeaje no válidos por lo que no tiene zonas blancas.

La parte rojiza alrededor de los soles 200-220 corresponde a los soles en los que se desató la tormenta de polvo en el planeta.

Durante el sol 40, coincidiendo con la tormenta, Insight detectó una señal que hace pensar en dust devils y ondas solitarias. En la Tierra, éstas estarían causadas por un frente de aire frío y su propagación. El sensor detectó un fuerte aumento en la pendiente de la presión con el tiempo que ocurría en cada anochecer. Más tarde se convirtió en 'golpes' de presión en la fase de descomposición de la tormenta. Estos golpes llegaron a alcanzar los 4Pa. Seguidamente hubo fluctuaciones de 900s tanto de presión como de temperatura, además de en la dirección y velocidad del viento [8].

Las variaciones de presión medidas por Insight proporcionan ejemplos de fluctuaciones de ondas de gravedad de 300-800s desde la tarde hasta la noche, pudiendo alcanzar en ocasiones hasta 2Pa de pico a pico. Estas ondas tienen

picos sistemáticos en la tarde y al anochecer, y no se producen durante el día. Son muy variables de un día a otro y dependen significativamente de la estación [8].

Durante la estancia de Insight, se han llegado a observar más de 1.000 dust devils con una caída de presión mayor a 0,5 Pa, provocados por vórtices convectivos. Estos vórtices causaron deformaciones en el suelo, las cuales se registraron en mediciones sísmicas [7].

A pesar de poder detectar tantos dust devils, siendo algunos muy fuertes y estando cerca de Insight, ninguno se ha podido observar visiblemente en los primeros 200 soles. Las pistas formadas por estos dust devils implican que se levanta suficiente polvo como para cambiar el albedo de la superficie. Sin embargo, esta cantidad sigue sin ser suficiente para poder captar dust devils visibles, que podrían haberse captado en otros lugares diferentes aún con menos vorticidad, bien porque la cámara de Insight no los logró capturar debido a al momento o por el número de observaciones realizadas [7, 8].

1.6. Objetivos de este trabajo

En este trabajo se han examinado los datos públicos obtenidos por el instrumento Insight, centrando el análisis en el campo de presión atmosférica. Los objetivos del trabajo son la búsqueda de variaciones bruscas de la presión que puedan ser producidas por el paso de vórtices convectivos, capaces de convertirse en dust devils y el análisis del campo general de presión estudiando la variabilidad atmosférica de la presión con las estaciones y el ciclo diario. En particular se ha realizado un análisis de la variabilidad diaria en términos de armónicos caracterizando las mareas diurnas solares y semi diurnas. Estas mareas solares determinan la mayor parte de la variabilidad diaria y su intensidad cambia en función de múltiples parámetros como el ciclo estacional, la presencia o no de tormentas de polvo y la topografía local. Es decir, estos efectos de mareas solares tienen un carácter local y diferente al ciclo de presión en otras localizaciones de Marte como el cráter Gale donde se encuentra en la actualidad el rover Curiosity de la misión Mars Science Laboratory. En un futuro próximo la presencia de una tercera estación meteorológica en otra región del planeta (la estación MEDA en el rover Perseverance en el cráter Jezero) permitirá un estudio mucho más preciso de la dinámica atmosférica en Marte estudiando los efectos de ondas de las mareas solares.

Parte de los resultados obtenidos en este trabajo son directamente comparables a los publicados por el equipo científico del instrumento TWINS [7]. Un objetivo fundamental ha sido poner a punto las herramientas de análisis con las que se podrán estudiar los datos simultáneos obtenidos por las tres estaciones meteorológicas en Marte a partir del próximo año.

2. Datos de Insight

2.1. Fuentes de datos utilizadas

El Planetary Data System (PDS) de NASA es el repositorio de datos de las misiones espaciales de la agencia espacial norteamericana NASA. Los datos de los instrumentos de Insight se encuentran en el nodo de geociencia del PDS en:

<https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/insight/index.htm>

Allí se incluyen los datos sin procesar y calibrados de todos los instrumentos y las descripciones de los diferentes instrumentos de la misión Insight. Además, se haya un calendario las fechas de liberación de próximos bloques de datos de la misión. Los datos del instrumento TWINS se pueden descargar desde el nodo de atmósferas del PDS.

https://atmos.nmsu.edu/data_and_services/atmospheres_data/INSIGHT/insight.html

En particular, los datos de presión utilizados en este trabajo se pueden descargar del enlace: https://atmos.nmsu.edu/PDS/data/PDS4/InSight/ps_bundle/data_calibrated/

A la hora de realizar este proyecto, estos datos me han sido proporcionados por el grupo de investigación de ciencias planetarias.

En las misiones de NASA a Marte una herramienta muy útil que documenta las actividades diarias y las medidas efectuadas es el Mars Data Analyst, con enlaces a los datos adquiridos en cada sol e información adicional como los diferentes calendarios correspondientes a cada sol. Está disponible de manera pública en: <https://an.rsl.wustl.edu/>

2.2. Características de los datos de presión

A pesar de que la estación TWINS tiene la capacidad de medir la presión de manera continua es inevitable que por problemas de hardware o comunicaciones con la Tierra haya bloques de datos perdidos resultando en soles con datos incompletos. Estos huecos pueden ser breves (una hora de un sol), extensos (varias horas) o pueden afectar a conjuntos extensos de soles consecutivos.

La figura siguiente muestra un ejemplo de los datos de presión obtenidos mediante el programa Insign_PS_plot_sol analizando el sol 22 de la misión. El gráfico muestra la existencia de un hueco de unas 4 horas a mitad de la tarde.

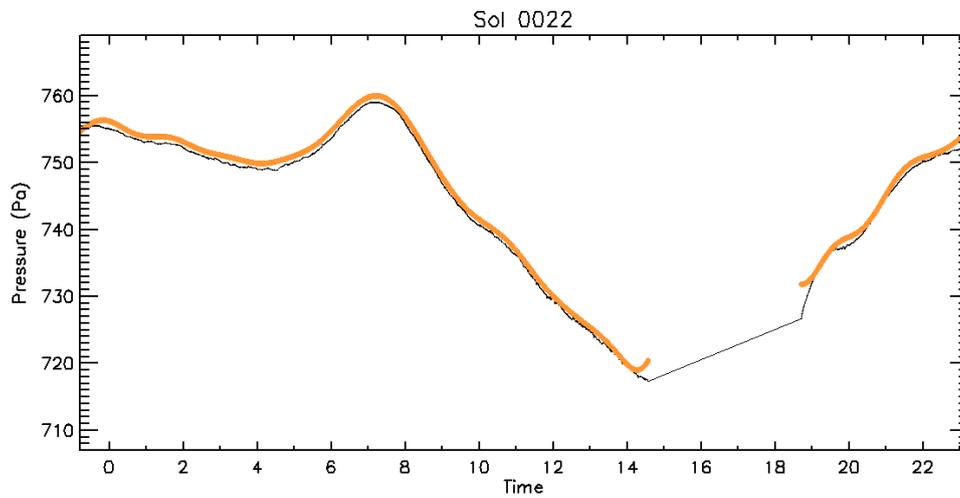


Ilustración 4. Datos de presión en Pa para el sol 22.

En el caso del sol 4, los datos de los que se disponen son prácticamente nulos.

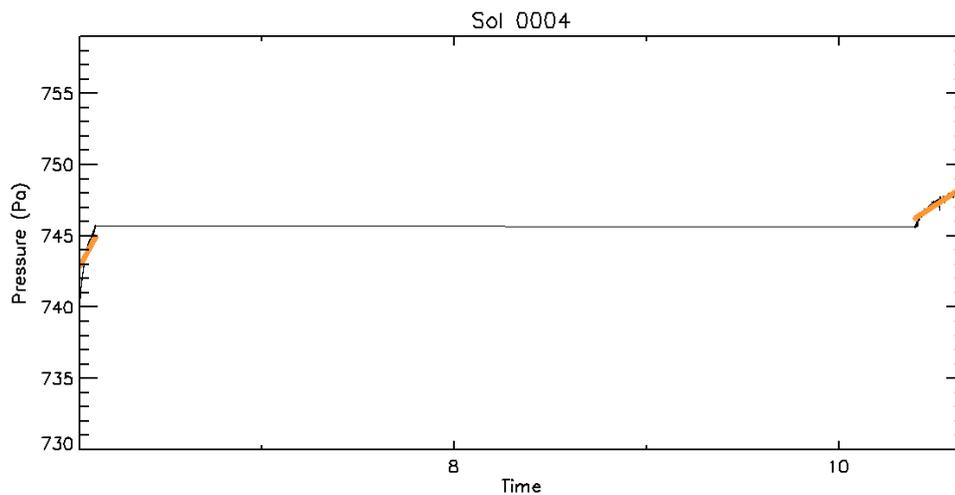


Ilustración 5. Datos de presión en Pa para el sol 4

En los casos más extremos, puede haber huecos largos en las que se alcanzan varios soles sin ningún dato. Este es el caso de los soles 6 al 9, en el que no se disponen de ningún dato.

2.3. Estrategias de análisis

El análisis de los datos de Insight se ha realizado con IDL (Interactive Data Language) utilizando un conjunto de programas desarrollados en el Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU. Los programas fundamentales son los siguientes:

`Insight_read_PS_sol`

Este programa permite la lectura de los datos de un único sol y su registro como variables del sistema.

Ejemplo de uso:

```
Insight_read_PS_sol, Sol=4,           $
                        LTST=LTST,     $
                        Time=Time,     $
                        Pressure=Pressure, $
                        Temp=Temp
```

El input del programa es el Sol que se desea estudiar y el output son variables vectoriales que contienen la presión, temperatura y tiempo en segundos y en formato de texto en horas LTST (Local True Solar Time). Estas variables leídas pueden ser utilizadas por programas posteriores para realizar gráficos o puede llamarse al programa `Insight_read_PS_sol` por otros programas que permitan hacer diferentes análisis.

Por ejemplo: el programa:

`Insight_plot_PS_sol, sol=40` permite la lectura de los gráficos de datos de un único sol (en este caso el sol número 40 de la misión).

El conjunto de programas utilizados se resume en la figura siguiente:

Nivel básico: Acceso a los datos

`Insight_read_PS_sol` (lectura de datos sol a sol)

`Insight_plot_PS_sol` (gráficos de datos de un único sol)

Nivel intermedio: Análisis de datos de un único sol

`Insight_dd_finder_sol` Requiere `Insight_read_PS_sol`

`Insight_fourier_analysis_ps_sol` Requiere `Insight_read_PS_sol`

Alto Nivel: Análisis sistemático de grandes conjuntos de sol

`Insight_fourier_analysis_ps_multiple_sols` Requiere `Insight_fourier_analysis_ps_sol`

`Insight_dd_finder_global` Requiere `Insight_dd_finder_sol`

Ilustración 6. Resumen del funcionamiento de los programas utilizados para este trabajo mediante IDL.

Para el análisis de datos, se ha hecho uso de otros dos programas:

Insight_dd_finder_sol. Este programa permite en análisis para encontrar dust devils en un único sol, pudiendo variar la ventana temporal de búsqueda, medida en segundos. Para su funcionamiento requiere el uso del programa **Insight_read_PS_sol**

Insight_fourier_analysis_ps_sol. Este programa permite desarrollar el análisis de Fourier en un único sol. Para su funcionamiento requiere del programa **read_Ps_sol**. Se deben seleccionar el número de armónicos con los que hará la aproximación y también la precisión de estos.

Si se quiere llevar a cabo un análisis de un conjunto de soles, se tienen a disposición otros dos programas:

Insight_fourier_analysis_ps_multiple_sol. Tendrá la misma función que el programa anterior, pero con varios soles. Por tanto, requiere de este anterior programa para su funcionamiento.

Insight_dd_finder_global que, siguiendo el mismo esquema, proporcionará los mismos resultados que **insight_dd_finder_sol**, pero con varios soles. De la misma forma, requiere de éste último programa para su correcto funcionamiento.

3. Análisis de las medidas de Presión: Búsqueda de Dust Devils

3.1. Vórtices convectivos y dust devils

Un Dust Devil es un remolino o torbellino fuerte de arena o polvo, formado por un vórtice convectivo. Existen tanto en la Tierra como en Marte. Los dust devils marcianos son mucho más grandes, anchos y comunes que en la Tierra. En ambos planetas los vórtices convectivos surgen a causa de diferencias de temperatura entre la superficie y el aire. Se observa la presencia de un vórtice convectivo cuando cae bruscamente la presión [9, 10].

Cuando el aire es arrastrado hacia la columna de aire convectivo, la velocidad de rotación va en aumento, debido a la conservación del momento angular. Al ser tan pequeños, no son influidos por la rotación del planeta, a diferencia de los huracanes. Surgen el mismo número de ciclónicos y anticiclónicos devils, independientemente del hemisferio.

Otras formas de reconocer dust devils son las emisiones de infrasonidos y campos eléctricos que se producen por emisiones del polvo cargado. Los dust devils pueden producir oxidantes atmosféricos como el ozono. Estos oxidantes pueden contribuir a la destrucción del metano [11].

Las simulaciones numéricas muestran que en la capa límite atmosférica, las células atmosféricas circulan en una amplia corriente descendente en el centro, y corrientes calientes en los bordes. Donde se unen estas dos corrientes, se forman los vórtices. Cuando hay una mezcla de polvo y arena, si ésta es demasiado pesada para ser levantada por lo que salta alrededor de la base del dust devil. Si el polvo es fino, éste se elevará por la columna del remolino y se ira centrifugando a medida que asciende.

Dependiendo del viento, el dust devil se moverá en una dirección o en otra. Un fuerte viento puede moverlo en línea recta. Un viento flojo sobre una superficie horizontal lo podría hacer mover aleatoriamente. Sobre una pendiente, se movería hacia arriba. Gracias a estos patrones se puede averiguar remotamente las condiciones del viento. Así, a su vez se puede conocer la actividad de los vórtices con días o meses de anterioridad.

3.2. Búsqueda de dust devils

Para la búsqueda de dust devils a través de los diferentes soles, se sigue una estrategia semejante a la implementada por Ordoñez-Etxeberria et al. Icarus (2018) [8].

El programa de IDL utilizado para la detección de dust devils ha sido **Insight_dd_finder_global**. Los parámetros que se deben colocar para que este programa funcione correctamente son: el sol desde el que se va a iniciar la búsqueda

(sol_start), el sol en el cual finalizará la búsqueda (sol_end), y la ventana de ésta (search_length). El programa busca caídas de presión, para caracterizar después los dust devils. Cuando éstas superan los 0,5 Pa, el programa lo detecta. La ventana de búsqueda ha de ser pequeña para que los datos sean correctos, ya que, sino, el programa podría interpretar una caída de presión, larga en el tiempo y no repentina, como un dust devil, cuando sería producido por otro motivo. Además, una ventana pequeña favorece a una mejor aproximación de los datos de presión y, por lo tanto, favorece a que no pasen desapercibidos dust devils que sean muy cortos en el tiempo, pero que podrían llegar a ser de caída de presión brusca. En este caso, la ventana de búsqueda general ha sido de 60 segundos.

Como soporte, también se ha usado **Insight_dd_finder_sol** para soles concretos y los datos obtenidos en la aproximación de Fourier por el programa **Insight_fourier_analysis_ps_sol** y **Insight_fourier_analysis_ps_multiple_sols**. Estos últimos programas han servido de ayuda para detectar qué soles no tenían suficientes datos para hacer una búsqueda correcta de dust devils o cuántos dust devils detectados correspondían a un falso positivo.

Se han buscado dust devils en los primeros 300 soles, que son los soles con los que se ha trabajado a lo largo de este proyecto.

A continuación, se mostrará como ejemplo una imagen producida por el programa a mediodía del sol 14. En este caso se trata del tercer evento detectado por el software.

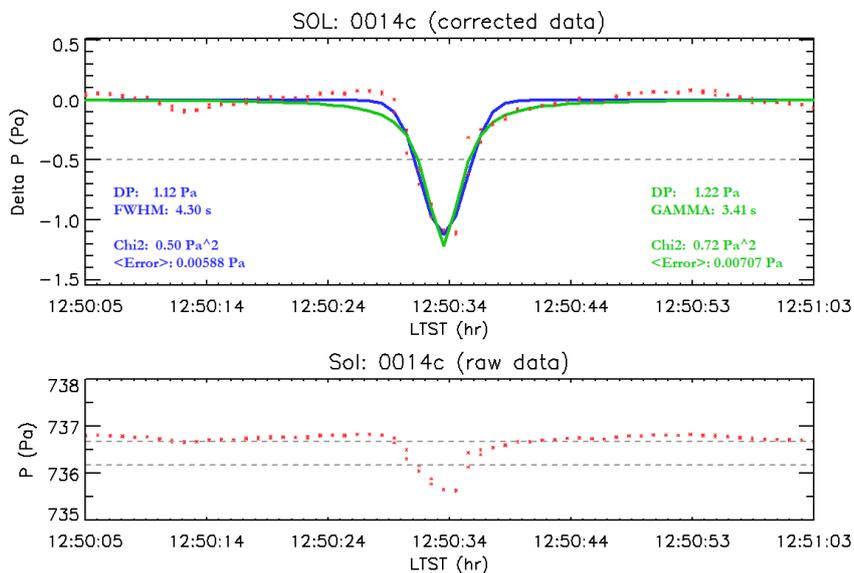


Ilustración 7. Dust devil observado poco después de a medio día mediodía del en el sol 14 de la misión Insight.

En la imagen superior se observa la gráfica de las diferencias de presión, medidas en Pascales, teniendo esta misma magnitud en el eje vertical y el LTST en el eje horizontal. Los puntos rojos corresponden a los datos. La línea discontinua marca la diferencia de 0,5 Pa mencionados anteriormente que se necesitan para que el programa

detecte la caída de presión. Las líneas azul y verde corresponden a las aproximaciones hechas para dichos datos. Las características de estas, tales como la diferencia de presión máxima o el error de las aproximaciones, se muestran a la izquierda y a la derecha, respectivamente.

En la imagen inferior el eje horizontal es el mismo, siendo el vertical la presión total, también medida en Pascales.

Sin embargo, como también se ha explicado anteriormente, no todos los dust devils detectados por el programa lo son realmente. A modo general, los criterios para la filtración han sido: Que la caída de presión no fuese más larga de 20 segundos (ya que, dejaría de ser una caída de presión 'brusca') y que la caída fuese igual o mayor de 0,5 Pa. Además, se han hallado bajadas de presión de casi 500 Pa, cosa que es imposible de darse. Por lo tanto, variaciones de presión demasiado altas también han sido filtradas. A pesar de este filtrado, también se comprobó, observando las aproximaciones por el análisis de Fourier, que hubiesen datos suficientes para la detección de los dust devils y que el programa no los capturase como éstos erróneamente. Esta inspección se ha desarrollado visualmente.

A continuación, se han recopilado gráficas de 3 dust devils en 3 categorías diferentes: Los 3 dust devils más intensos, los más largos y 3 que a tempranas horas de la mañana o a últimas de la tarde.

La primera imagen, corresponde a los 3 dust devils más intensos detectados:

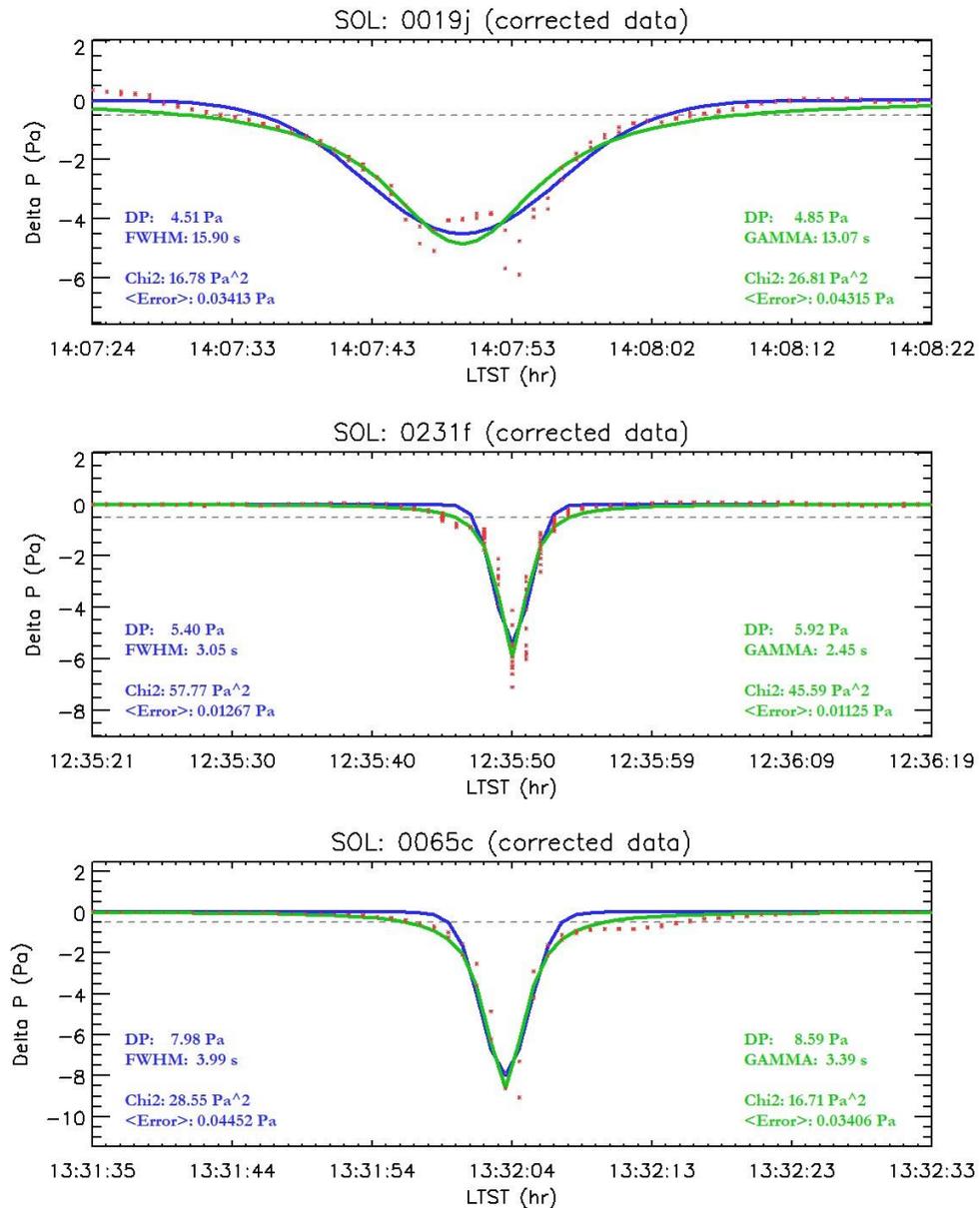


Ilustración 8. Recopilación de las tres caídas de presión más intensas detectadas por el software. Nótese el evento 65c (tercer evento ocurrido en el Sol 65) con una caída de presión de entre 8 a 8.6 Pa dependiendo del tipo de ajuste gaussiano (azul) o sigue una función de Lorentz (verde).

Estas son caídas de presión más intensas, producidas a mediodía, cuando posiblemente la diferencia de temperatura entre el suelo y el aire es mayor, favoreciendo así el desarrollo de fenómenos convectivos.

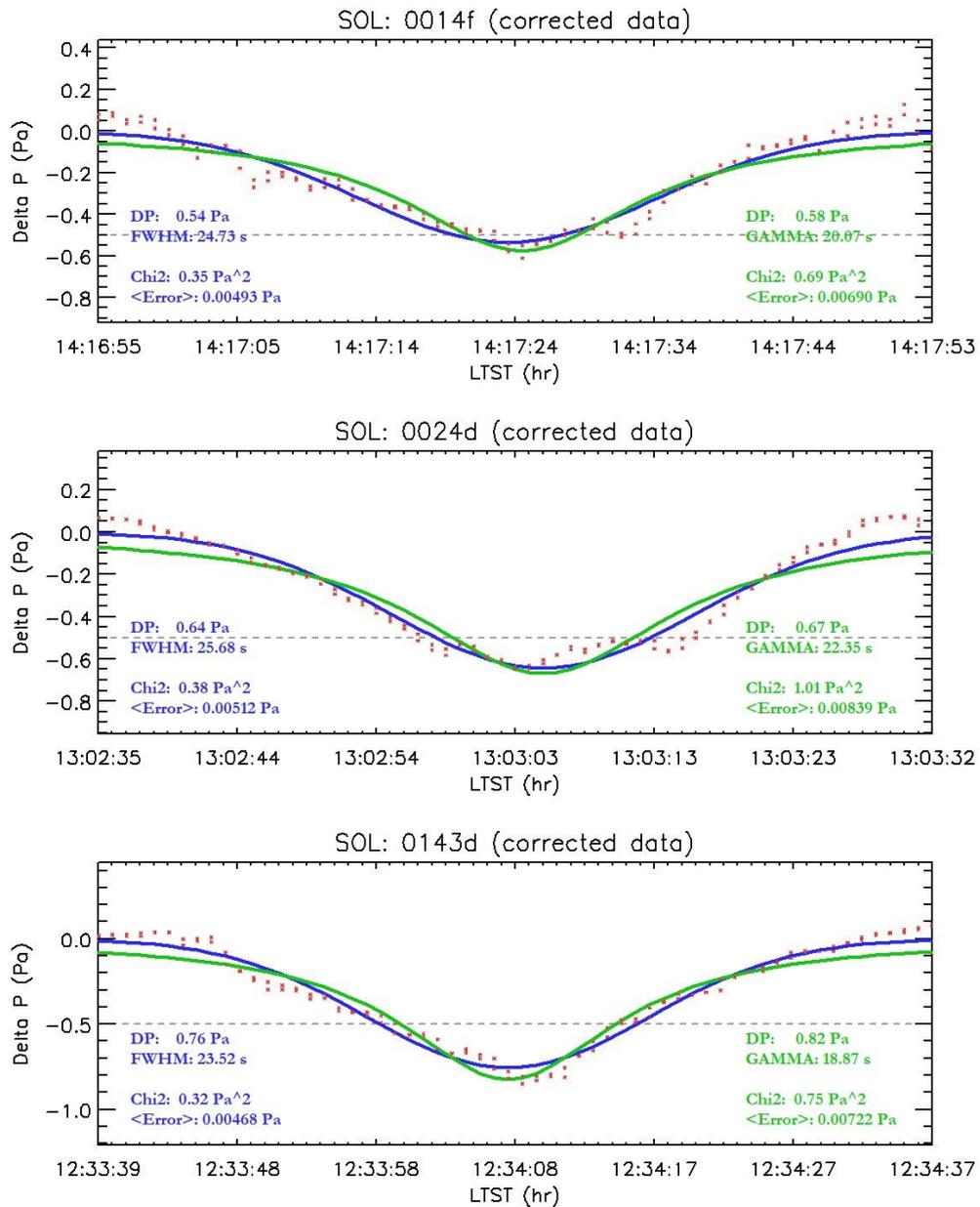


Ilustración 9. Ejemplo de caídas de presión largas. Los tres casos seleccionados corresponden a los eventos de mayor duración de los encontrados en el análisis sistemático de los datos de Insight.

El segundo grupo de imágenes corresponden a caídas de presión largas en el tiempo: En este caso las caídas de presión son menos intensas, pero más prolongadas que posiblemente sean creadas por eventos convectivos extensos pero lejanos y que también ocurren mayoritariamente a horas cercanas al mediodía.

El tercer grupo de imágenes, corresponde a la recopilación de dust devils en horas menos comunes, alejadas del mediodía, a primera hora de la mañana o a últimas horas de la tarde:

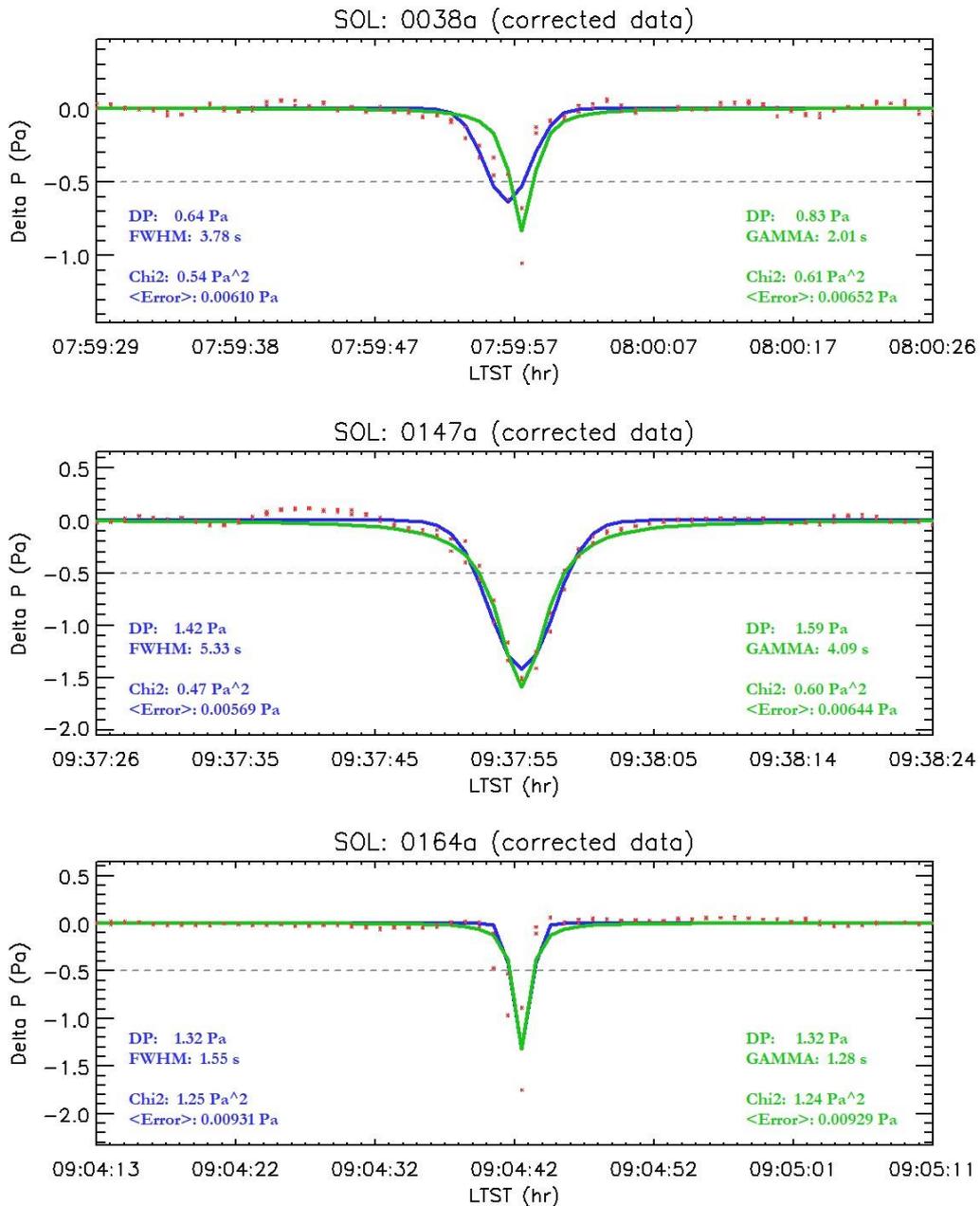


Ilustración 10. Ejemplos de caídas bruscas de presión ocurridas en horas alejadas del mediodía cuando la diferencia de temperatura entre suelo y aire es pequeña y no se esperan eventos convectivos.

Las caídas de presión mostradas en la figura 4 son semejantes a las caídas de presión típicas producidas en horas cercanas al mediodía y no parecen ser producidas por variaciones turbulentas ruidosas del campo de presión. Estos eventos no parecen ser estacionales y podrían indicar alguna peculiaridad de la meteorología local en la región de Insight.

3.3. Distribución global

Los dust devils se producen al haber diferencias de temperatura entre la superficie del planeta y el aire. Debido a esto, depende de la irradiancia del sol y por lo tanto, serán más frecuentes en unas horas determinadas del día. Del mismo modo, las estaciones influyen en la cantidad de dust devils que se vayan a producir.

En este apartado se estudiará la distribución global de estos eventos a lo largo de los días marcianos o soles. Esta distribución se presenta en la figura 11 en dos paneles que estudian la distribución estacional de dust devils (como función del sol de la misión o el Ls marciano) y la distribución diaria (como función de la hora del día en Local True Solar Time). La figura representa los datos obtenidos por los programas en IDL analizando los primeros 300 soles de la misión Insight.

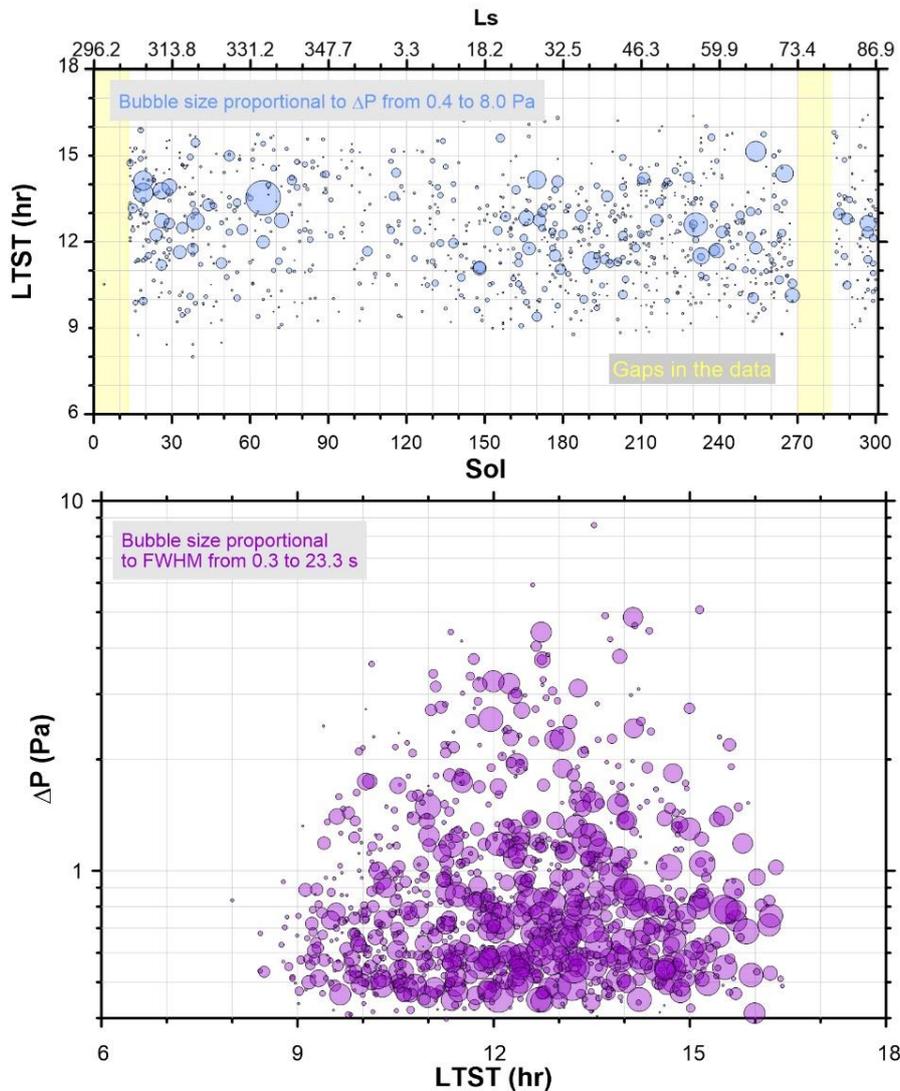


Ilustración 11. Gráfico de burbujas para la distribución global de los dust devils producidos en Marte en los 300 primeros soles de la misión Insight.

La imagen anterior muestra la cantidad de dust devils producidos y la intensidad, según su tamaño, desde los 0,4 Pa hasta los 8,0 Pa. En el eje vertical se muestran las horas en las que se producen estos dust devils, en LTST. En el eje horizontal se muestran los soles. Tanto en los primeros soles como alrededor del sol 270 se muestran unos huecos en la gráfica, debido a que no se dispone de datos para dichos soles. La línea naranja marca el comienzo de la tormenta de polvo a su llegada a Insight. Como se puede apreciar, poco después de este momento los dust devils producidos son mucho más intensos.

En la gráfica inferior, el tamaño de las burbujas está asociado al tiempo de duración de los dust devils, desde 0,3 segundos a 23,3 segundos en su largura máxima. En el eje vertical se mide la intensidad de la caída de presión, en Pascales. En el eje horizontal se muestran las horas en los que se producen los dust devils en LTST. Como se puede observar, la gran mayoría están concentradas al medio día. Además, los eventos de mayor duración también se dan a estas horas.

En la segunda imagen se observa como la mayoría de estos dust devils están concentradas en las horas del mediodía. Eso es debido al calor de la superficie, que es mayor a esas horas [8]. Aunque Insight dispone de sensores de temperatura del aire como parte de los sensores de TWINS esos datos no han sido utilizados en este trabajo. En particular la falta de datos de temperatura de la superficie no permite realizar el mismo tipo de análisis de las correlaciones entre dust devils encontrados y diferencias de temperatura entre la superficie y el aire.

En análisis anteriores de la frecuencia de dust devils en conjuntos extensos de datos suele haber más eventos durante la primavera y el verano, es decir desde Ls 180° a 360° [8]. En este caso el muestreo estacional de dust devils en los 300 sol de la misión abarca únicamente Ls entre 296 y 86 representativos de la transición entre el invierno (que comienza en Ls=270 en el solsticio de invierno), la llegada de la primavera (que comienza con el equinoccio de primavera en Ls=0) y la transición hacia el verano (que comienza en el solsticio de verano en Ls=90)¹. Por lo tanto, los datos explorados no permiten hacer una comparativa exhaustiva con los datos publicados en el cráter Gale para varios años marcianos. Sin embargo, sí se aprecia un mínimo de actividad cercano al equinoccio de primavera con un aumento posterior de la actividad convectiva al ir avanzando la primavera con un aumento de eventos, sobre todo intensos, que había menguado durante el invierno.

El siguiente gráfico muestra el número de eventos detectados por sol poniendo de manifiesto el mínimo de actividad acontecido al final del invierno. Esta tendencia estacional no parece afectar sin embargo a los eventos más intensos, mostrados también en dicha figura.

¹ Para una guía básica de la relación entre Ls y estaciones ver:
http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude.html

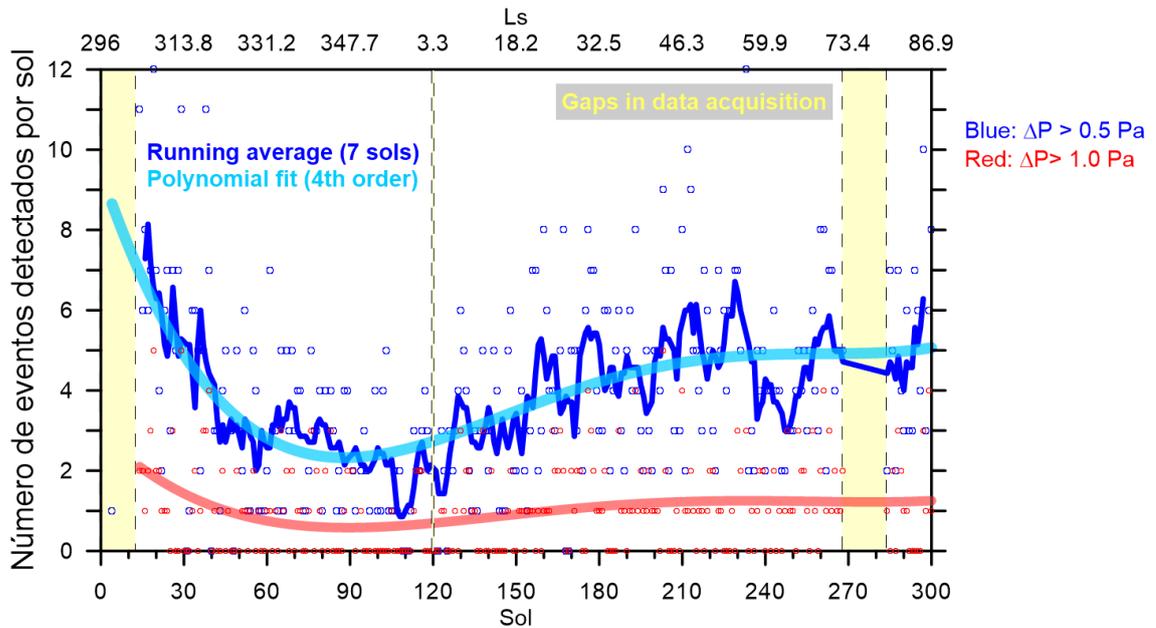


Ilustración 14. Número de evento (dust devils) detectados por sol. Caídas de presión mayores a 0,5 Pa mostradas en azul. Caídas de presión mayores a 1 Pa mostradas en rojo.

Ilustración 15. Gráficas de presión y temperatura en Marte. Ilustración 16. Número de evento (dust devils) detectados por sol. Caídas de presión mayores a 0,5 Pa mostradas en azul. Caídas de presión mayores a 1 Pa mostradas en rojo.

En el eje vertical se muestra el número de eventos detectados por sol. En el horizontal inferior el sol correspondiente, en el superior, el Ls correspondiente. Los puntos azules corresponden al número de eventos mayores de 0,5 Pa, los rojos, a mayores de 1 Pa. Las líneas azul clara y roja muestran una gráfica hecha mediante un polinomio de orden 4, mientras que la azul oscura muestra la media de 7 soles. Se puede observar claramente de nuevo, la caída en el número de eventos durante el invierno, hasta la llegada de la primavera en la que el número de caídas de presión aumenta. Las caídas de presión mayores a 1 son mucho menos comunes, aunque en invierno la proporción de éstas frente al número de eventos totales aumenta notablemente.

4. Análisis de las variaciones diarias de presión

4.1. Las mareas solares en Marte

Las mareas térmicas son oscilaciones térmicas que dominan a escala global la atmósfera media y superior de un planeta que gira rápidamente (al igual que la Tierra). Las mareas tienen periodos en los subarmónicos de un día solar [12].

Las mareas térmicas son repuestas de la atmósfera en forma de armónicos a la insolación, ya sea por absorción de luz solar o mediante el calentamiento de la superficie y su intercambio de calor con la atmósfera. Las mareas provocan variaciones diarias. Algunos componentes de las mareas tienen carácter de ondas de gravedad, que se propagan de forma vertical. La amplitud crece exponencialmente según la densidad disminuye con la altitud. Esto provoca un fuerte impulso de los flujos en la atmósfera media y alta. Uno de los efectos producidos es la amplificación de la corriente que desciende y calienta adiabáticamente regiones de latitudes altas. Estos componentes provocan oscilaciones en la temperatura con la altura con una alta amplitud y que cambian de fase a lo largo del día.

Existe un patrón en los contrastes de temperatura entre día y la noche en la atmósfera marciana que concuerda con el modo de marea diurna solar mediante la teoría de mareas clásica [13].

Las variaciones de presión diurnas están controladas por las mareas diurnas y semi diurnas, producidas por el calentamiento proveniente del sol. La amplitud de las mareas atmosféricas en localidades con una topografía llana, están mayormente dominadas por la cantidad de polvo atmosférico [14].

La inercia térmica de la atmósfera es muy baja, por lo que los contrastes de temperatura entre la noche y el día, en la capa más pegada a la superficie, pueden llegar a los 100K. Normalmente estos contrastes rondan los 50K. Dicho contraste provoca un ciclo de mareas térmicas globales. Esto tiene un efecto directo en la presión, ya que, a mayor aumento de la temperatura del aire, menor es la presión del lugar, y al revés. La curva de presión y la de la temperatura son inversas entre sí. Un ejemplo de esto se mostrará a continuación en una imagen obtenida en el sitio web de descarga de los datos de Insight [15].

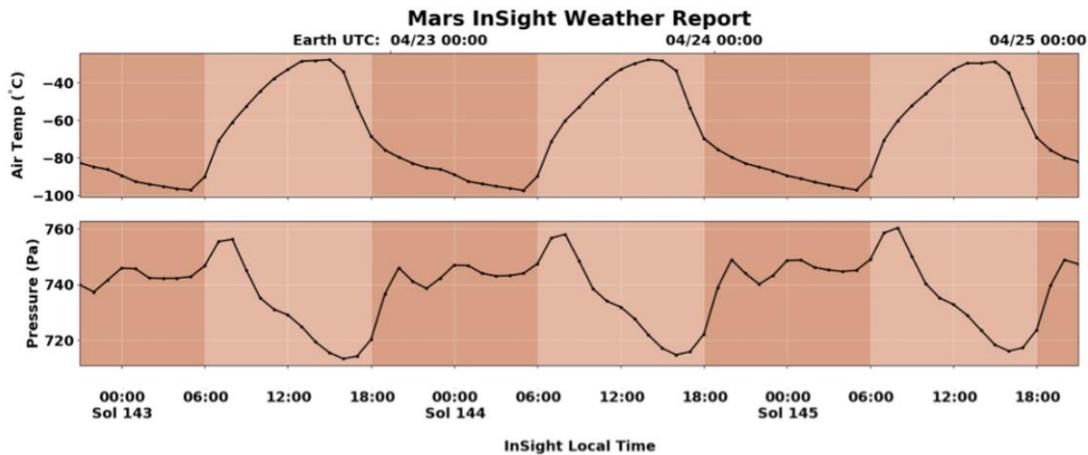


Ilustración 17. Gráficas de presión y temperatura en Marte.

Ilustración 18. Presiones promedio en la superficie de Marte y amplitud de los modos armónicos en los que puede descomponerse las variaciones diarias. Ilustración 19. Gráficas de presión y temperatura en Marte.

Se puede observar cómo ambas gráficas presentan una curva inversa entre ellas. Los picos de la gráfica de temperatura corresponden con los valles de la presión, y al revés. Por otro lado, las mareas también provocan cambios en los vientos de la superficie, especialmente en periodos de alta opacidad de polvo.

La presión en Marte cambia cada día gracias a estos efectos provocados por las mareas solares. Estas variaciones dependen tanto de las estaciones como de la localización sobre Marte.

Las variaciones topográficas también se han de tener en cuenta, ya que pueden modificar el calentamiento solar (como ejemplo, el aire delgado de las regiones altas tiene una respuesta dinámica mayor al calentamiento de la superficie). Además, el flujo se desvía alrededor de los obstáculos topográficos que encuentre. Esto provoca una modificación en la marea. Por un lado, las longitudes de onda pueden estirarse espacialmente por la estructura de fondo de la temperatura y del viento. Además, se excitan modos que no son función de la hora local. No se debe olvidar que la topografía cercana a InSight es mayormente llanura, pero que se encuentra cerca de la segunda región volcánica más grande del planeta.

La amplitud de la marea diurna migratoria sufre fuertes variaciones semestrales tanto en las cercanías del ecuador y en las latitudes medias del hemisferio sur. La marea semi diurna migratoria también las sufre en la zona ecuatorial y en las latitudes medias del hemisferio norte, con una variación anual en el hemisferio opuesto [8].

4.2. Análisis de Fourier de los datos de presión

Gracias a los análisis de Fourier sobre los 300 soles, se pueden caracterizar diariamente las variaciones de presión producidas por las mareas solares y el calentamiento de la superficie por la radiación solar.

Con la ayuda de estos análisis, se han generado unas gráficas que recogen los datos de los 300 primeros soles en los que Insight estuvo en funcionamiento en Marte. De esta manera, se ha realizado una descomposición de la señal de presión en términos armónicos mediante los programas detallados en el apartado 2.3. Los resultados de estos análisis se mostrarán a continuación en la siguiente gráfica:

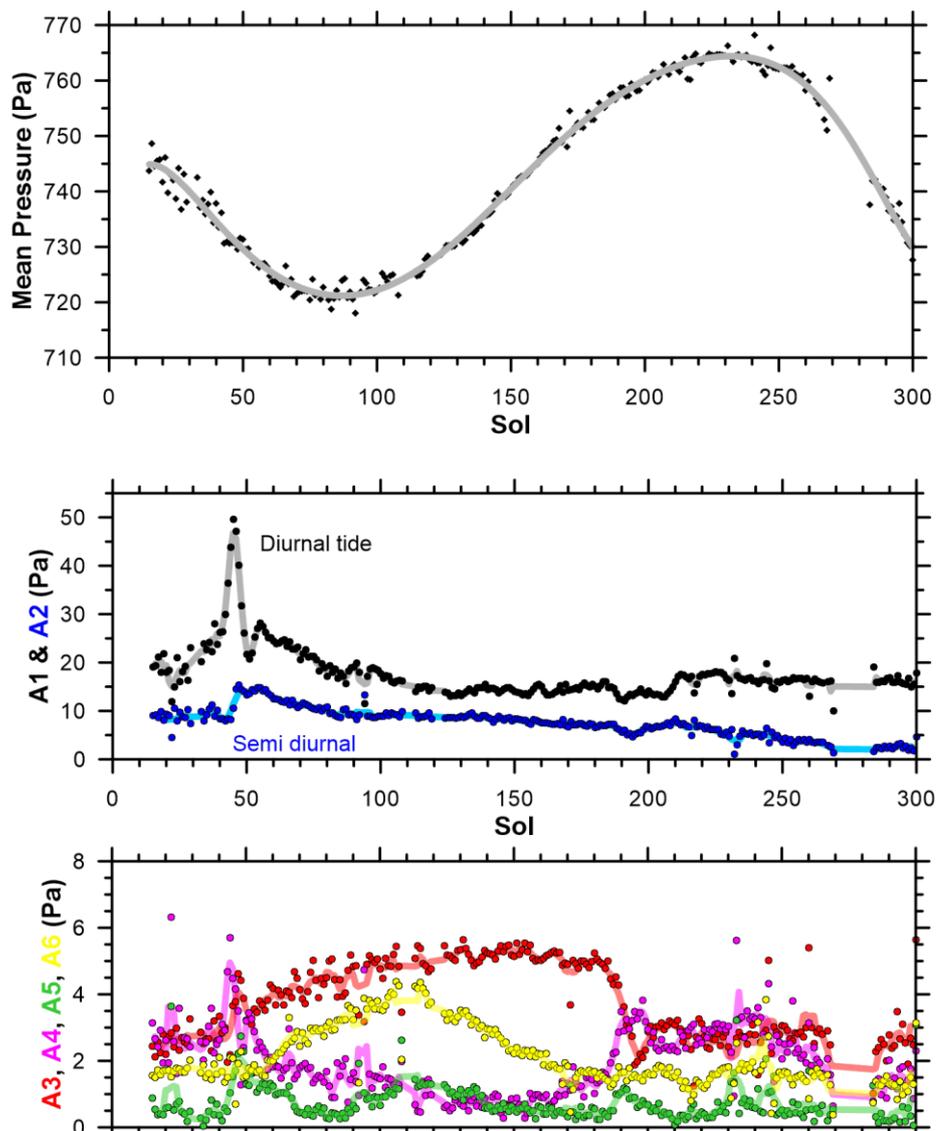


Ilustración 20. Presiones promedio en la superficie de Marte y amplitud de los modos armónicos en los que puede descomponerse las variaciones diarias.

Ilustración 21. Presiones promedio en la superficie de Marte y amplitud de los modos armónicos en los que puede descomponerse las variaciones diarias.

La gráfica superior muestra la presión media en la superficie de Marte. Varía como efecto de las estaciones y la sublimación o congelación de CO₂ atmosférico en las regiones polares. Debido a esto, los dos mayores picos de presión corresponden a los periodos con mayor contenido de este componente en la atmosfera. Se observa como la presión media oscila los 740 Pa. Llega a disminuir hasta los 720 Pa con un pico a 760 Pa cerca del sol 250 de la misión.

El pico del final de la primavera es mayor debido a la abundancia de CO₂ en el polo sur y la excentricidad de la órbita. De esta forma la sublimación del hemisferio sur será mayor que la del hemisferio norte proporcionando mayor cantidad de CO₂ a la atmósfera. Durante el invierno la situación es inversa y la presión atmosférica alcanza valores que son 250 Pa por debajo de ese pico de primavera. Las altas temperaturas de corresponden con valores de presión altos. A su vez, las temperaturas bajas con valores de presión más bajos. Las diferencias de presión producidas por las diferencias de temperatura causan una expansión vertical de la atmosfera cuando se alcanzan altas temperaturas [10].

La gráfica intermedia muestra los dos primeros términos del análisis armónico (marea diurna con periodo de 24 horas) y semi diurna (con periodo de 12 horas). Estos dos términos están relacionados con la variabilidad global diaria. El pico inicial que se ve alrededor del sol 50, en la marea diurna (A1), mucho mayor que todos los demás, corresponde a los efectos de la tormenta de polvo de escala global de 2019 que coincidió con la estancia de Insight en el planeta. También se aprecia un pico, de menor tamaño, en la marea semi diurna (A2) alrededor de estos soles.

La tercera gráfica muestra las amplitudes de los modos armónicos superiores, cuya interpretación es más compleja. Sus variaciones indican la presencia de cambios en el comportamiento diario de la presión. Estas variaciones de orden suplementario pueden estar relacionadas con la topografía local y su análisis puede requerir la comparación con modelos numéricos de mesoscala. Destaca un cambio importante en la amplitud del tercer armónico (A3) alrededor del sol 190 de la misión Insight (cerca de Ls=32 entrada ya la primavera). Este cambio está acompañado por un cambio de menor magnitud pero claro en los modos de marea diurna y semi diurna y podría ser indicativo de un cambio en el régimen de vientos. En principio estos cambios están alejados de la temporada de tormentas de polvo descartando efectos asociados a posibles tormentas.

5. Resumen y Conclusiones

Este trabajo se ha realizado en parte como trabajo preparatorio para el análisis de datos semejantes que serán obtenidos por el instrumento MEDA en la misión espacial Mars 2020. MEDA es la estación meteorológica del rover Perseverance y obtendrá datos similares (más muchos otros) a los analizados en este trabajo.

Se han estudiado y caracterizado las caídas de presión producidas por dust devils, por medio de los datos obtenidos por la misión Insight. Se ha estudiado como el ciclo y variación estacional y diurno afecta a la cantidad e intensidad de estos dust devils.

Así, desde el Ls 210º hasta 360º corresponde a la época de tormentas de polvo, donde los dust devils pueden ser más intensos. La tormenta que se produjo en Marte de inicio al final de esta temporada de tormentas. En los 300 soles estudiados, se presentan dos picos en respecto al número de eventos producidos. El primero corresponde con el equinocio de invierno, cuando Insight comienza a funcionar. En dicho pico, la media de eventos diarios es de 9. El segundo, de mucho menor tamaño, corresponde con el comienzo de la primavera, con una media de 5 eventos diarios.

En el ciclo diurno, los dust devils suelen frecuentarse alrededor del mediodía, ya que corresponde a cuando la diferencia entre la temperatura de la superficie y la del aire es mayor. Cuanto mayor sea esta diferencia, de mayor intensidad pueden ser las caídas de presión.

También se ha realizado un análisis de la variedad diurna y semi-diurna en términos armónicos de mareas solares, en la que además de las causas anteriormente comentadas en este apartado, también la topografía puede influirlas. Por tanto, depende de la localidad donde se encuentren y las circunstancias ambientales en cada momento.

6. Referencias

- [1] Atmósfera de Marte. Agrupación Astronómica Jeranza Magallanes, en <https://agrupacionastronomicamagallanes.wordpress.com/el-universo-gaseoso/la-atmosfera-de-marte/>, visualizado en julio de 2020
- [2] Rover Environmental Monitoring Station Mars Science Laboratory (NASA), en <https://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/>, visualizado en julio de 2020.
- [3] Mars Insight misión (NASA), en <https://mars.nasa.gov/insight/mission/science/goals/>, visualizado en julio de 2020.
- [4] <http://astrometrico.es/2018/11/25/instrumentos-insight-marte/>, visualizado en julio de 2020.
- [5] Banfield, D. et al. (2020). The atmosphere of Mars as observed by InSight. *Nature Geoscience*, 13, 190-198.
- [6] Martian seasons and solar longitude. En http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude.html , visualizado en julio de 2020.
- [7] INS Notebook. En <https://an.rsl.wustl.edu/ins/an/an3.aspx> , visualizado en julio de 2020.
- [8] Montabone et al. (2020). Martian Year 34 Column Dust Climatology from Mars Climate Sounder Observations: Reconstructed Maps and Model Simulations, *JGR: Planets* (en prensa). Disponible en astro-ph: <https://arxiv.org/abs/1907.08187>
- [9] Dust Devil (Wikipedia) en https://en.wikipedia.org/wiki/Dust_devil visualizado en julio de 2020.
- [10] Ordoñez-Etxeberria, I. et al. (2018). A systematic search of sudden pressure drops on Gale crater during two Martian years derived from MSL/REMS data, *Icarus*, 299, 308-330.
- [11] Ralph D. Lorenz (2020). Physics today. Dust devils on Mars
- [12] JGR planets (The Journal of Geophysical Research Planets). (2015) Seasonal variation of Martian middle atmosphere tides observed by the Mars Climate Sounder
- [13] J Geophys Res. (2009) Thermal Tides in the Martian Middle Atmosphere as Seen by the Mars Climate Sounder
- [14] Ordoñez-Etxeberria, I. et al. (2019). Meteorological pressure at Gale crater from a comparison of REMS/MSL data and MCD modelling: Effect of dust storms, *Icarus*, 317, 591-609.

[15] Iñaki Ordoñez Etxebarria. (2018) Meteorología de la atmósfera de Marte durante la misión Mars Science Laboratory: Dust devils y tormentas de polvo.

Lista de Acrónimos

IDL	Interactive Data Language
INSIGHT	Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport
LST	Local Solar Time, equivalente al Local Mean Solar Time
LTST	Local True Solar Time
MEDA	Mars Environmental Data Analyzer
MSL	Mars Science Laboratory
REMS	Rover Environmental Monitoring Station
PDS	Planetary Data System
SEIS	Seismic Experiment for Interior Structure
HP3	Heat Flow and Physical Properties Probe
RISE	Rotation and Interior Structure Experiment
TWINS	Temperatures and Winds for InSight